



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

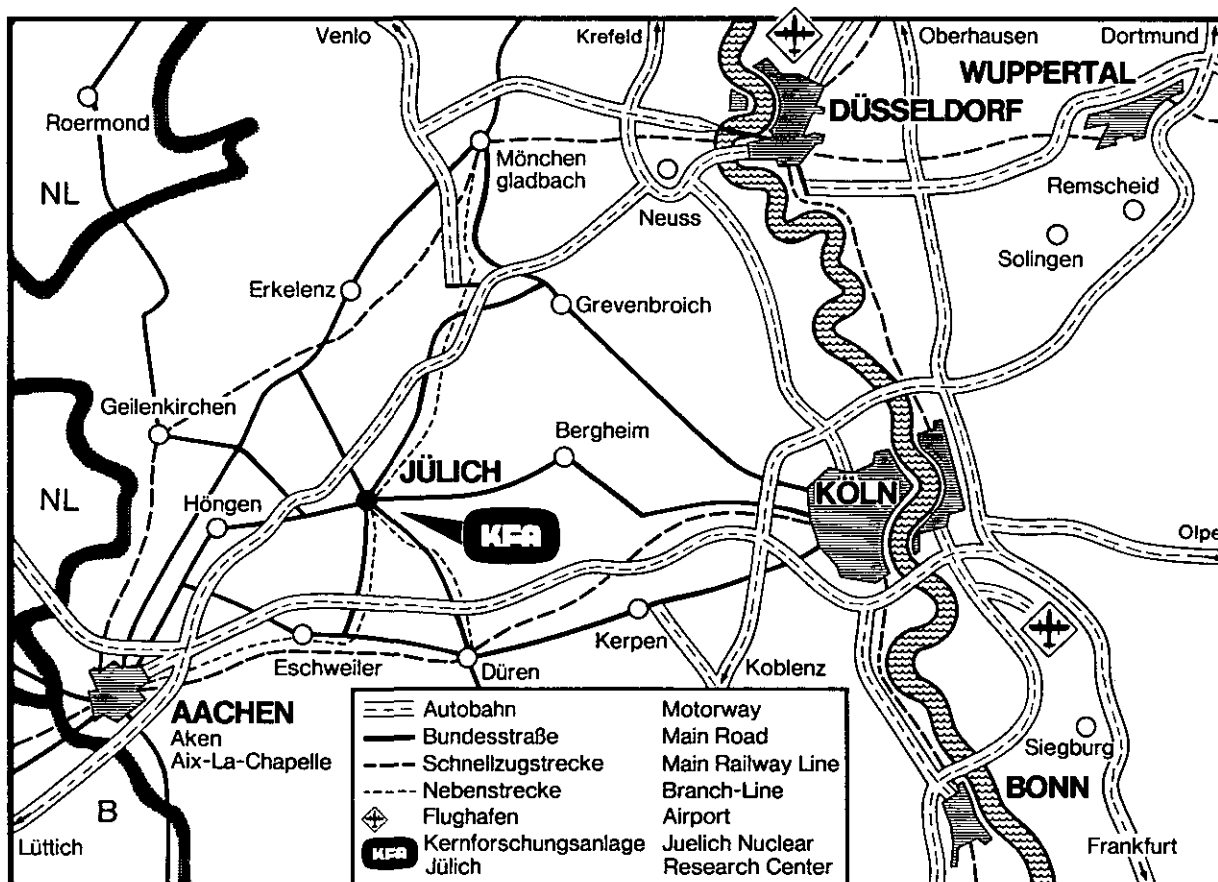
Institut für Reaktorentwicklung

**Bautechnische Gesichtspunkte bei Reaktor-
druckbehältern aus Spannbeton und deren
Hauptkomponenten hinsichtlich ihrer
Auslegung, Fertigung und Kosten**

von

H. Zintl

**JÜI - Spez - 3
März 1978
ISSN 0343-7639**



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 3

Institut für Reaktorentwicklung Jülich - Spez - 3

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

**Bautechnische Gesichtspunkte bei Reaktor-
druckbehältern aus Spannbeton und deren
Hauptkomponenten hinsichtlich ihrer
Auslegung, Fertigung und Kosten**

von

H. Zintl

D 82 (Diss. T.H. Aachen)

CONSTRUCTIONAL ASPECTS IN CONNECTION WITH PRESTRESSED
CONCRETE REACTOR PRESSURE VESSELS AND THEIR MAIN COMPONENTS
CONCERNING THEIR DESIGN, MANUFACTURE AND COSTS

by

H. Zintl

ABSTRACT

Prestressed concrete pressure vessels are employed on an international scale for gas-cooled reactors. The possible structural configurations used in this connection are represented systematically. Particularly the problems of building-up, testing and damage of prestressed concrete pressure vessels are being dealt with.

The advantages presented by prestressed concrete reactor pressure vessels compared with those of boiler steel from safety engineering aspects are confronted with disadvantages concerning the cost factors mainly resulting from the design and the arrangement of the vessel and from the extended construction period involved. To reduce these disadvantages, suggestions are made to improve the construction system of the vessels, and the associated effect on both period and cost of construction is determined as a function of the size and number of the vessels.

BAUTECHNISCHE GESICHTSPUNKTE BEI REAKTORDRUCKBEHÄLTERN
AUS SPANNBETON UND DEREN HAUPTKOMPONENTEN HINSICHTLICH
IHRER AUSLEGUNG, FERTIGUNG UND KOSTEN

von

H. Zintl

KURZFASSUNG

Für gasgekühlte Reaktoren werden Druckbehälter aus Spannbeton international eingesetzt. Die dabei zur Anwendung gelangten Gestaltungsmöglichkeiten werden systematisch dargestellt. Insbesondere werden auch Fragen des Aufbaues, der Prüfung und des Abbruches von Spannbetonbehältern behandelt.

Den sicherheitstechnischen Vorteilen, die Reaktordruckbehälter aus Spannbeton gegenüber solchen aus Kesselstahl bieten, stehen Kostennachteile gegenüber, die sich hauptsächlich durch die Behälterkonstruktion und -bauweise und der damit verbundenen längeren Bauzeit ergeben. Um diese Nachteile zu verringern, werden Vorschläge zur Verbesserung der Behälterbauweise gemacht, und der damit verbundene Einfluß auf Bauzeit und -kosten in Abhängigkeit der Behältergröße und -stückzahl ermittelt.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. AUFBAU UND FUNKTION VON SPANNBETONBEHÄLTERN	3
2.1 Prinzipieller Aufbau	
2.2 Vergleich von Reaktordruckbehältern aus Spannbeton und aus Kesselstahl	6
2.3 Beispiele für gebaute, im Bau und in Planung befindliche Reaktordruckbehälter aus Spannbeton	8
3. PRINZIPIELLE GESTALTUNGSMÖGLICHKEITEN VON SPANNBETONBEHÄLTERN	12
3.1 Allgemeine Übersicht	12
3.2 Komponentengestaltung von Reaktordruckbehältern	12
3.2.1 Behälterhüllen	14
3.2.2 Behälterbewehrungen	20
3.2.3 Behälterdichthäute (Liner)	29
3.2.4 Behälterwärmeisolationen	36
3.2.5 Behälterkühlsysteme	41
3.2.6 Behälterfundamente	44
3.2.7 Behälterdurchführungen (Panzerrohre)	45
3.2.8 Behälterabschlüsse (Deckel)	49
3.2.9 Behälterinstrumentierungen	53
4. BEISPIELE FÜR SPANNBETONBEHÄLTER	55
4.1 Spannbetonbehälter des Reaktors THTR Uentrop	55
4.2 Spannbetonbehälter des Reaktors HTR 1160	56
4.3 Spannbetonbehälter des Reaktors PR 500	58
4.4 Bewertung von Spannbetonbehältern	59
5. TECHNISCHE ASPEKTE VON SPANNBETONBEHÄLTERN	61
5.1 Abmessungen und Mengen	61
5.2 Flexibilität von Behälteranordnungen	62
5.3 Extrapolation von Behälterabmessungen und -anordnungen auf größere Leistungseinheiten	62

5.4	Sicherheitsanforderungen	62
5.5	Wiederholungsprüfbarkeit von Linern	64
5.6	Reparierbarkeit von Linern	66
5.7	Abbaubarkeit von Spannbetonbehältern	70
6.	FERTIGUNGSTECHNISCHE ASPEKTE VON SPANNBETONBEHÄLTERN	81
6.1	Anlagen- und Behälterkonstruktion des Reaktors PR 500	81
6.2	Behältereinzelfertigung des Spannbetonbehälters SBB 189	81
6.3	Behälterserienfertigung des Spannbetonbehälters SBB 189	82
6.3.1	Serienbildung an Spannbetonbehältern	82
6.3.2	Entwicklung des Serienproduktes Spannbetonbehälter SBB 189	83
6.3.3	Konstruktionen des Serienbehälters SBB 189	83
6.3.4	Behälterbauweisen des Serienbehälters SBB 189	85
6.3.5	Dimensionierung der Serienbehälter und -elemente	88
6.3.6	Ermittlung der Seriengröße an Spannbetonbehältern	93
6.3.7	Organisation des Fertiungsablaufes	94
7.	BAUZEIT UND BAUKOSTEN VON SPANNBETONBEHÄLTERN	101
7.1	Einfluß von Behälterparametern auf die Baukosten	102
7.2	Kostengleichungen für die Behälterkomponenten	105
7.3	Bauzeiten verschiedener Behältergrößen und -bauweisen	112
7.4	Baukosten des Spannbetonbehälters SBB 189	114
7.5	Baukosten verschiedener Behältergrößen und -bauweisen	115
7.6	Auswirkungen der Serienauflage von Spannbetonbehältern auf Bauzeit und Baukosten	116
7.7	Zeit- und Kostenschätzung für Kernkraftwerke im deutschen Offshorebereich	121
7.8	Zeit- und Kostenschätzung des Abbruches von Spannbetonbehältern und der Stilllegung von Kernkraftwerken	121
8.	ZUSAMMENFASSUNG	123
9.	LITERATURVERZEICHNIS	124

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BE	Brennelemente
DE	Dampferzeuger
DWR	Druckwasserreaktor
FT	Fertigteil
HHT	Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine
HTR	Hochtemperaturreaktor
INT	Integrierte Behälterbauweise
KKW	Kernkraftwerk
LWR	Leichtwasserreaktor
NINT	Nichtintegrierte Behälterbauweise
NWA	Nachwärmeabfuhr
PNP	Prototyp Nukleare Prozeßwärme
PR	Prozeßwärmereaktor
R	Rekuperatoren
RDB	Reaktordruckbehälter
SBB	Spannbetonbehälter
SNR	Schneller, Natriumgekühlter Brutreaktor
THTR	Thorium-Hochtemperaturreaktor
V	Vorkühler
WT	Wärmetauscher

1. EINLEITUNG

Hauptsächlich durch die physikalischen Eigenschaften des gasförmigen Kühlmittels bedingt, werden für gasgekühlte Reaktoren Druckbehälter aus Spannbeton eingesetzt. 1958 wurde der erste Spannbetonbehälter (SBB) für das französische Kernkraftwerk Marcoule G2 mit graphitmoderiertem und CO₂-gekühltem Reaktor gebaut. Seitdem werden für gasgekühlte Reaktoren Druckbehälter aus Spannbeton eingesetzt.

In der Bundesrepublik Deutschland wird dieser Behältertyp erstmalig beim THTR-Kernkraftwerk Uentrop ausgeführt, mit dessen Bau 1971 begonnen wurde und dessen Fertigstellung voraussichtlich 1980 zu erwarten ist.

Bei der Auslegung der Hauptkomponenten solcher SBB ist eine Vielfalt von Kombinationsmöglichkeiten zur Anwendung gekommen, die durch den Reaktortyp bestimmt wurden.

In einem ersten Teil der Arbeit wird der Stand der Technik beim SBB-Bau dargestellt, indem zuerst alle gebauten, im Bau und Planung befindlichen Reaktordruckbehälter aus Spannbeton aufgezeigt werden und auf eine Vielzahl von Konstruktionsmöglichkeiten eingegangen wird. Dazu wird der gesamte SBB in die Komponenten Betonhülle, Bewehrung, Dichthaut, Wärmeisolation, Kühlsystem, Fundament, Durchführungen, Abschlüsse und Instrumentierung eingeteilt und für jede Komponente an Hand von Merkmalen eine Systematik erstellt, die es ermöglicht, verwirklichte Komponentenkonzepte zu vergleichen. Beispiele von Ausführungsvarianten dieser Komponenten aus der Praxis schließen dieses Kapitel ab.

In einem zweiten Teil werden technische Fragen angeschnitten, die sich verstärkt auf die jüngst sehr aktuellen Probleme der Wiederholungsprüf-, Reparatür- und Abbaubarkeit von SBB beziehen.

Der fertigungstechnische Teil beleuchtet den Aspekt einer Serienfertigung von SBB, die für kleine Reaktoren zur Prozeßwärmeerzeugung von Interesse sein könnte. Um den Wiederholungseffekt der Serie im SBB-Bau zu erreichen, wird dazu der SBB aus einzelnen Fertigteilen aufgebaut, die einmal Block- und einmal Schalencharakter haben und für diese Behälterbauweisen, die monolithische eingeschlossen, unterschiedliche Fertigungsorganisationen dargestellt.

Der abschließende Teil unternimmt den Versuch, Baukosten und Bauzeiten beim SBB-Bau zu ermitteln, insbesondere Kostengleichungen zur überschlägigen Kostenermittlung von Behälterkomponenten an die Hand zu geben, den Einfluß verschiedener Parameter auf die SBB-Kosten zu zeigen und Bauzeitdegressionen und Verbilligungen im SBB-Bau durch den Serieneffekt abzuschätzen.

Insgesamt soll die Arbeit einen Einblick in die Baukonstruktion und -technologie von Reaktordruckbehältern aus Spannbeton mit den zusammenhängenden, komplexen Schwierigkeiten vermitteln und eine Anregung zur Vereinfachung der Herstellung geben.

Während des Baues und Betriebes ist ein SBB den Lastfällen Eigengewicht, Vorspannung, Innendruck, Temperatur, Kriechen und Schwinden ausgesetzt, die bei der Auslegung eines SBB zu berücksichtigen sind.

Zur genauen Ermittlung des Spannungszustandes im SBB aufgrund dieser Lastfälle haben sich in den letzten Jahren dreidimensionale Rechenprogramme als geeignet erwiesen. Dies sind die Methoden der finiten Elemente und der dynamischen Relaxation. Die Erläuterungen für diese speziellen Rechenmethoden können in der einschlägigen Literatur /97,98,99/ nachgelesen werden.

Für eine überschlägige Dimensionierung eines SBB, wird im Nachfolgenden eine vereinfachte Spannungsrechnung zur Ermittlung der Schnittkräfte im SBB, der Spannkabelkräfte und der Anzahl an Spanngliedern durchgeführt.

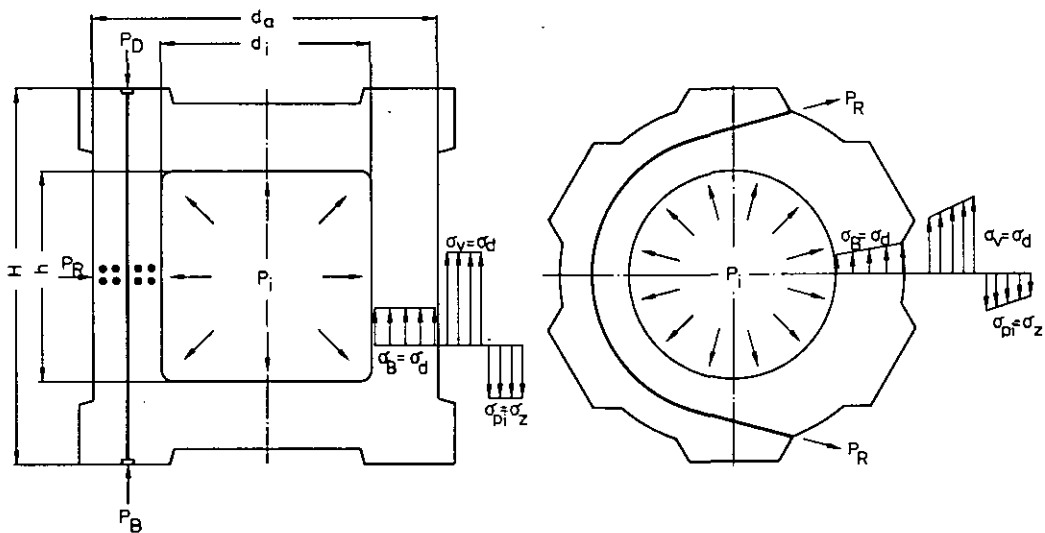


Bild 2.2: Vereinfachte Spannungsdarstellung im SBB aufgrund Vorspannung und Innendruck

darin bedeuten:

- h = Innenhöhe des Behälters
- H = Außenhöhe des Behälters
- d_i = Innendurchmesser des Behälters
- d_a = Außendurchmesser des Behälters
- p_i = Innendruck
- $P_{D,B}$ = Deckel- und Bodenkraft
- P_R = Ringzugkraft

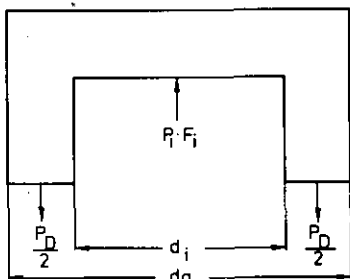
- σ_V = Spannung durch die Vorspannung
- σ_{pi} = Spannung durch den Innendruck
- σ_B = Spannung im Betriebszustand
- σ_Z = Zugspannung
- σ_d = Druckspannung

Ermittlung der Schnittkräfte, der zulässigen Spannkabelkräfte und der Anzahl an Spanngliedern

Für diese Ermittlungen gilt:

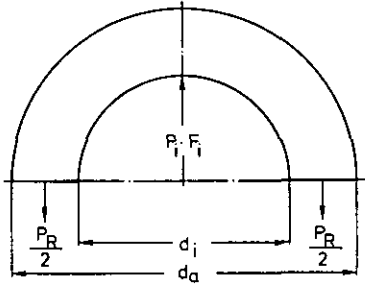
- P_D = Deckel- und Bodenkraft
- P_R = Ringzugkraft
- β_Z = Zugfestigkeit des Spannstahles
- β_S = Streckgrenze des Spannstahles
- F_S = Fläche des Spannstahles
- σ_{zul} = zulässige Spannstahlspannung
- σ_{grenz} = Spannstahlspannung bei Grenzzustand mit Linerintegrität
- P_{zul} = zulässige Spannstahlbelastung
- P_{grenz} = Spannstahlbelastung bei Grenzzustand mit Linerintegrität
- n_{erf} = erforderliche Anzahl an Spanngliedern
- n_{gew} = gewählte Anzahl an Spanngliedern
- z = Zuschlag für Kriechen des Betons und Relaxation der Spannstähle

1. Vertikale Vorspannung



$$\begin{aligned}
 2 \frac{P_D}{2} \text{ (Mp)} &= p_i \cdot F_i \\
 P_D \text{ (Mp)} &= p_i \cdot \frac{d_i^2 \pi}{4} \\
 \sigma_{zul} \text{ (Mp/m}^2\text{)} &= 0,7 \cdot \beta_Z \\
 \sigma_{grenz} \text{ (Mp/m}^2\text{)} &= 0,95 \cdot \beta_S \\
 P_{zul} \text{ (Mp/Stck)} &= F_S \cdot \sigma_{zul} \\
 P_{grenz} \text{ (Mp/Stck)} &= F_S \cdot \sigma_{grenz} \\
 n_{erf} \text{ (Stck)} &= \frac{P_D}{P_{zul}} \\
 n_{gew} \text{ (Stck)} &= z \cdot n_{erf} \\
 &= (1,08 \dots 1,11) n_{erf}
 \end{aligned}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{nach vorläuf.} \\ \text{Richtlinien} \\ \text{für SBB /7/} \end{array}$$

2. Ringspannglieder



$$\begin{aligned}
 2 \frac{P}{2} R \text{ (Mp/m)} &= p_i \cdot F_i \\
 P_R \text{ (Mp/m)} &= p_i \cdot d_i \cdot 1 \\
 \sigma_{zul} \text{ (Mp/m}^2\text{)} &= 0,7 \cdot \beta_z \\
 \sigma_{grenz} \text{ (Mp/m}^2\text{)} &= 0,95 \cdot \beta_S \\
 P_{zul} \text{ (Mp/Stck)} &= F_S \cdot \sigma_{zul} \\
 P_{grenz} \text{ (Mp/Stck)} &= F_S \cdot \sigma_{grenz} \\
 n_{erf} \text{ (Stck/m)} &= P_R / P_{zul} \\
 n_{grenz} \text{ (Stck/m)} &= z \cdot n_{erf} \\
 &= (1,08 \dots 1,15) n_{erf}
 \end{aligned}$$

wobei nach genauen Rechnungen $z = 8 \dots 15\%$ bei Behälterwandungen von 3 m beträgt je nach Vorspanngrad und Betontemperatur.

2.2 Vergleich von Reaktordruckbehältern aus Spannbeton und aus Kesselstahl

Bild 2.3 zeigt eine Gegenüberstellung der Auslegungsmerkmale von Reaktordruckbehältern aus Spannbeton (SBB) und solchen aus Kesselstahl (KSB).

Die Größe von Reaktordruckbehältern wird hauptsächlich bestimmt durch Brennelemente, Moderator, thermischer Schild und Kühlmittelführende Kanäle im und um das Core. Besonders die physikalischen Eigenschaften des Kühlmittels führen bei gasgekühlten Reaktoren zu größeren Druckbehälterabmessungen als bei wassergekühlten. Der Druck und die Temperatur des Kühlmittels sind die wichtigsten Auslegungsdaten für die Reaktordruckbehälter und werden nach wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten optimiert.

So liegen bei gasgekühlten Reaktoren die Kühlmitteldrücke wesentlich niedriger, die Kühlmitteltemperaturen jedoch beträchtlich höher als bei wassergekühlten. Die damit verbundenen Leistungsdichten fallen von 50 bis 100 MW/m³ bei wassergekühlten auf 6 MW/m³ (z.B. beim THTR-Uentrop) bei gasgekühlten ab, so daß zur Erzeugung einer gleichen Leistung ein viel größeres Core und damit verbunden ein viel größerer Druckbehälter erforderlich wird.

Da für solche Behälterabmessungen Stahl wegen ausführungstechnischer und wirtschaftlicher Gründe als Baustoff z. Zt. noch ungeeignet erscheint, kommen für gasgekühlte Reaktoren nur Druckbehälter als Spannbeton in Frage.

Merkmal	Reaktordruckbehälter aus Kesselstahl	Reaktordruckbehälter aus Spannbeton
Statisches Prinzip des Behälters	Kesselwände nehmen Innendruck auf	-axiale und radiale Spannkabel kompensieren durch Vorspannung den Innendruck -im Betrieb Spannungen daher sehr klein -verbleibende kleine Restspannungen werden durch schlaffe Bewehrung des Betons aufgenommen.
Dichtigkeit	Stahlwand	innerer Liner
Material	Stahlkörper aus ferritischen Stahl 22NiMoCr37 und austenitischer Stahlplattierung XCrNi18 8	Beton Bn 450 Schlaffstahl BSt 22/34 GU Spannstahl St 170/190 Linerstahl TT St E 29
Abmessungen	$D_i = 5...6 \text{ m}$ $H_i = 15 \text{ m}$ $s_i = 0,2 \text{ m}$	$D_i = 15...17 \text{ m}$ $H_i = 15 \text{ m}$ $s_i = 10 \text{ m}$
Druck des Kühlmediums	$p = 160 \text{ bar}$	$p = 40...50 \text{ bar}$
Spannungen in der Behälterwand	$\sigma_z = 15 \text{ kp/mm}^2$	$\sigma_D = 5 \text{ kp/mm}^2$
Temperatur der Behälterwand	$T = 280...320 \text{ }^\circ\text{C}$	$T = 50...60 \text{ }^\circ\text{C}$
Dosis der Behälterwand	10^{19} n/cm^2 ($E > 0,1 \text{ MeV}$)	10^{18} n/cm^2 ($E > 0,1 \text{ MeV}$)
Grenze bezüglich der Abmessungen	$D_i < 6 \text{ m}$	$D_i < 20 \text{ m}$
Berstsicherheit	Risse können wachsen: Berstsicherheit nur über Wahrscheinlichkeitsaussage(10^{-6}) definierb.	Risse können wegen Druckbeanspruchung nicht wachsen; Berstsicherheit durch Redundanz der Kabel gegeb.
Wiederholungsprüfbarkeit	Ist fast an allen Stellen gegeben	in heutigen Konzepten nicht oder nur teilweise gegeben
Bauzeit	relativ kurz 1...2 a Fertigung	relativ lang 3...4 a Fertigung
Vorfertigung	Vorfertigung in der Werkstatt	Baustellenfertigung
Kosten	$K = 30 \text{ Mio DM}$	$K = 200 \text{ Mio DM}$

Bild 2.3: Vergleich von Reaktordruckbehältern aus Spannbeton und aus Kesselstahl bei Reaktoren der 1200 MW_{el}-Klasse

Bild 2.4 zeigt die Verwendung von Reaktordruckbehältern (RDB) aus Spannbeton und aus Kesselstahl für konzipierte und ausgeführte Leichtwasser- und gasge- kühlte Reaktoren im Zusammenhang mit den Auslegungsdaten /1,2,3/.

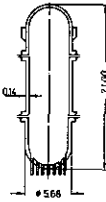
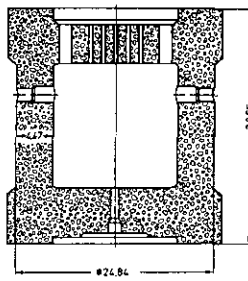
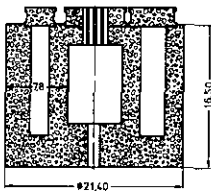
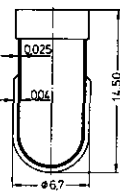
Reaktortyp		Leichtwasser- reaktoren		gasgekühlte Reaktoren				
Standort		Biblis	Brunsbüttel	Hartle- pool	Schme- hausen	EDF 4	Wylfa	gasgek. Schneller Brüter (Studie)
Typ		Druck- wasser	Siede- wasser	AGR	THTR	Natururanreak.		
Brennstoff		UO ₂	UO ₂	>2%U235	>90%U235	UO ₂	UO ₂	20-30% UO ₂
Moderator		H ₂ O	H ₂ O	Graphit	Graphit	Graphit	Graphit	-
Kühlmittel		H ₂ O	H ₂ O	CO ₂	He	CO ₂	CO ₂	He/H ₂ O-Dampf
Wirkungsgrad (%)		33.1	33.6	41	42	35	35	40
Leistung (MWel)		1145	770	2 x 625	300	480	590	300
Auslegungsdaten für die RDB	Druck des Kühlmittels	158	71	40	40	30	29.2	85
	Kühlmittel- Temperatur	316	285	650	750	400	400	600 - 700
	Baustoff des Druckbehälters	Stahl	Stahl	Spann- beton	Spann- beton	Spann- beton	Spann- beton	Spann- beton
	Betontempe- ratur (°C)	---	---	60	40 - 45	< 60	< 60	< 60
	Innendurch- messer	5.00	5.58	13.10	15.90	19.0	29.5	-5.8
	Außendurch- messer (m)	5.48	5.86	25.90	24.84	28.5	36.0	-21.4
	Höhe innen (m)	12.43	20.70	18.30	15.30	36.3	29.5	9.5
	Höhe außen (m)	12.90	21.00	29.20	28.55	49.1	36.5	16.5
Geometrie der RDB	Leichtwasser- reaktoren SWR-Brunsbüttel	Hochtemperaturreaktoren THTR-Uentrop			Schnelle Brüter			
					Gas- o. Dampfkühlung (Projektstadium)		Natriumkühlung SNR	
								

Bild 2.4: Auslegungsdaten und Geometrien von RDB aus Kesselstahl und Spannbeton

2.3 Beispiele für bereits gebaute, im Bau und in Planung befindliche SBB















Wie aus Bild 2.5 hervorgeht, sind - einschließlich der im Bau befindlichen - bis zum heutigen Zeitpunkt in insgesamt 24 Fällen SBB als RDB international eingesetzt worden. Die wichtigsten spezifischen Daten sind dort zusammenge- faßt dargestellt. So wurde bereits 1952 mit dem Bau des ersten SBB für das französische Kernkraftwerk (KKW) Marcoule G2 begonnen; die Anwendung des SBB wurde international weiter über eine Reihe von KKW bis zum heute im Bau be-

Kernkraftwerk	Land	Baubeginn/ kritisch	N _{el} (MW _{el})	N _{th} (MW _{th})	Kühl- mittel- teil (°C)	Betr.- druck ₂ kp/cm ²	Reaktor- typ	Anz. d. Re- akt.	Anordnung der Dampf- erzeuger	Beton- volumen v(m ³)	Beton- güte 2 (kp/cm ²)	Hand- aufbau	Spann- stahlbe- darf (t)	Armie- rungsbe- darf (t)	Spannst. güte 2 (kp/mm ²)	Spann- verfahren	Hüllrohr- verpres- sung	Kenn- zahl V/N _{th}
Marcouite G2, G3	Fr.	1952/1960	37	100	CO ₂	330	15,0	Graph./CO ₂	2	außerhalb	6660	mono.	750	3000	140	Coyne	nein	66,0
EDF 3	Fr.	1961/1966	480	1600	CO ₂	410	30,6	Graph./CO ₂	1	außerhalb	18900	mono.		1000	170/190	SEEE	teilw.	14,6
Chinon 3	Fr.	1961/1967	480	1297	CO ₂	410	27,5	Graph./CO ₂	1	außerhalb	18900	mono.		1000	170/190	SEEE	teilw.	14,6
O'dourry 1,2	U.K.	1962/1968	300	834	CO ₂	410	27,1	Magnox	2	int. um Kern	18500	mono.	2850	284	130	Freysinet	nein	22,2
EDF 4	Fr.	1963/1969	480	1600	CO ₂	410	30,6	Graph./CO ₂	1	int. um Kern	24300	mono.	2260	800	170/190	SEEE	teilw.	15,2
St. Laurent des Eaux 1	Fr.	1963/1969	487	1316	CO ₂	410	28,5	Graph./CO ₂	1	int. um Kern	25000	mono.	2260	800	170/190	SEEE	teilw.	19,0
Wyifa 1,2	U.K.	1963/1971	590	1875	CO ₂	414	27,0	Magnox	2	int. um Kern	21200	mono.	2540	2240		Freysinet	nein	11,3
St. Laurent des Eaux 2	Fr.	1963/1971	515	1392	CO ₂	410	28,5	Graph./CO ₂	1	int. um Kern	25000	mono.	2260	800	170/190	SEE	teilw.	19,0
Hinkley P. 1,2	U.K.	1965/1975	625	1500	CO ₂	645	40,0	AGR	2	int. um Kern	22600	mono.				CCL 707		15,0
Bugey 1, EDF 5	Fr.	1966/1972	540	1495	CO ₂	410	43,3	Graph./CO ₂	1	int. um Kern	10500	mono.		146/166		BBR-B		7,0
Vandellios	Spanien	1966/1972	515	1392	CO ₂	410	28,5	Graph./CO ₂	1	int. um Kern	25500	mono.	2260			SEEE	teilw.	18,0
Dungeness 1,2	U.K.	1966/1976	607	1450	CO ₂	675	30,5	AGR	2	int. um Kern	12500	mono.				BBR-V	nein	8,6
Hunterston B	U.K.	1966/1976	625	1500	CO ₂	645	40,0	AGR	1	int. um Kern	22600	mono.				CLC 707		15,0
F.St.Vrain	U.S.A.	1968/1973	330	841	He	785	48	HTR	1	int. um Kern	3250	mult. la	1016			BBR-V		3,9
Hartlepool 1,2	U.K.	1968/1978	622	1500	CO ₂	648	45,3	AGR	2	pod boiler	11600	mono.	4572	2540		CCL 28/07	nein	7,7
Heysham 1,2	U.K.	1968/1978	622	1500	CO ₂	648	45,3	AGR	2	pod boiler	11600	mono.	4572	2540		CCL 28/07	nein	7,7
THTR-Uentrop	BRD	1971/1980	300	750	He	750	40,0	HTR	1	int. um Kern	10000	mono.	1620	650	145/160	BBR-V	ja	13,3
HTR 1160	BRD/USA		1160	3000	He	761	47,5	HTR	1	pod boiler	13900	mono.	1960	870	170	Dywidag		4,6

Bild 2.5: Spezifische Daten ausgeführter SBB

findlichen SBB des deutschen KKW THTR Uentrop fortgesetzt.

Welche Ausführungsformen an SBB dabei verwirklicht wurden, ist aus Bild 2.6 ersichtlich, wobei der stehende Zylinder mit Zylindercore und ebenen Abschlußflächen den derzeitigen Stand der Technik verkörpert.

Kernkraftwerke	Behälterform		I-Ø [m]	I.H. [m]	A-Ø [m]	A.H. [m]	S _W [m]	S _D [m]	S _B [m]
	Beschreibung	Abbildung							
Marcoule G2,G3	Horizontaler Zylinder, konkav gewölbte Enden		13,69	15,63	20,00	27,50	2,99	2,99	2,99
Chinon 3	Kurzer vertikaler Zylinder, flache Enden		19,00	21,45	29,00	35,10	5,04	6,91	5,00
E.D.F. 3	Kurzer vertikaler Zylinder, flache Enden		19,00	21,00	28,50	32,00	4,75	5,50	5,50
Oldbury 1,2	Kurzer vertikaler Zylinder, flache Enden		23,45	18,30	33,85	32,35	4,58	6,40	6,71
E.D.F. 4	Langer vertikaler Zylinder, flache Enden		19,00	36,30	28,50	49,25	4,75	6,42	6,42
St.Laurent des Eaux, 1 & 2, Vandellós	Vertikaler Zylinder, flache Enden		19,00	36,30	28,50	48,00	4,75	5,70	6,00
Wylfa 1,2	Flach endender Zylinder mit runder Corekaverne		29,25	29,25	35,50	36,30	3,36	3,66	3,36
Hinkley Point B, Hunterston	Kurzer vertikaler Zylinder, flache Enden		18,90	19,40	28,95	35,65	5,03	5,49	7,51
Bugey 1 E.D.F. 5	Langer vertikaler Zylinder, flache Enden		17,08	38,25	28,00	53,15	5,49	7,46	7,46
Dungeness-B 1,2	Kurzer vertikaler Zylinder, flache Enden		19,95	17,70	27,60	29,95	3,81	6,33	5,95
Fort St. Vrain	Vertikaler Zylinder, flache Enden		9,45	22,85	18,60	32,30	2,74	4,73	4,73
Hartlepool, 1,2 Heysham 1,2	Kurzer vertikaler Zylinder, flache Enden, Pods in den Wänden		13,10	18,30	25,90	29,25	6,40	5,49	5,49
THTR-Uentrop	Kurzer vertikaler Zylinder, flache Enden		15,90	15,30	24,80	25,50	4,45	5,10	5,10
HTR-GAC	Kurzer vertikaler Zylinder, flache Enden, Pods in den Wänden		14,02	11,28	29,40	27,60	7,30	8,20	8,20

I.Ø = Innendurchmesser, I.H. = Innenhöhe, A.Ø = Außendurchmesser, A.H. = Außenhöhe, S_W = Mindestwanddicke, S_D = Mindestdeckeldicke, S_B = Mindestbodendicke

Bild 2.6: Formen und Abmessungen ausgeführter SBB

Bezieht man das aufgewendete Betonvolumen auf die thermische Reaktorleistung eines jeden SBB, siehe dazu die letzte Spalte V/N_{th} des Bildes 2.5, so ergibt sich ein Trend zu immer kleineren Wandstärken des SBB. Im Bild 2.7 sind die Kurvenverläufe einmal auf den Bauzeitbeginn und einmal auf den Inbetriebnahmezeitpunkt des KKW bezogen dargestellt.

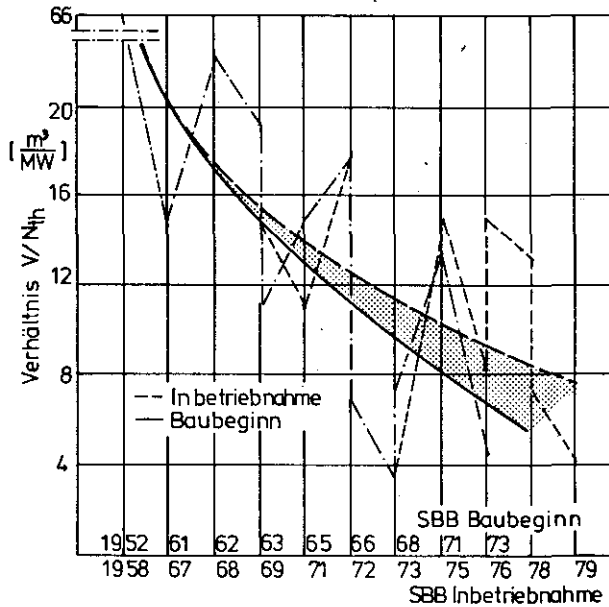


Bild 2.7:

Betonvolumina bezogen auf die thermischen Reaktorleistungen verschiedener SBB für den Bauzeitbeginn und den Inbetriebnahmezeitpunkt

3. PRINZIPIELLE GESTALTUNGSMÖGLICHKEITEN VON SPANNBETONBEHÄLTERN

Im vorangegangenen Kapitel wurden u. a. ausgeführte SBB vorgestellt. Neben diesen ausgeführten wurden und werden Überlegungen angestellt, in welcher Art die einzelnen SBB-Komponenten gestaltet werden können. Diese Vielfalt von Konstruktionsmöglichkeiten basiert entweder auf rein theoretischen Untersuchungen oder in Verbindung mit dem Bau von Spannbeton-Modellbehältern, wie sie von verschiedenen Firmen des In- und Auslandes gebaut wurden.

3.1 Allgemeine Übersicht

Bild 3.1 katalogisiert solche technische Realisierungsmöglichkeiten an Hand von Auslegungskriterien, wobei eine Aufteilung des SBB in seine Komponenten Betonhülle, Bewehrung, Dichthaut, Wärmeisolation, Kühlsystem, Fundament, Abschlüsse, Durchführungen und Instrumentierung vorgenommen wird.

3.2 Komponentengestaltung von SBB

Die zur Beschreibung der Behälterkomponenten verwendeten Kriterien sind nicht bei allen Komponenten gleich, da sich nicht überall zutreffend erscheinen. Bei den meisten Komponenten werden folgende Kriterien verwendet:

- Notwendigkeit der Komponente
- Konstruktion und Bauweise
- Komponentenform und -anordnung
- Material
- Beanspruchung
- Fertigung und Montage

Weiterhin wird versucht, aufgrund dieser Kriterien bei allen Komponenten eine Systematik zu erstellen und Ausführungsvarianten aus der Praxis aufzuzeigen.

3.2.1 BETONHÖLLE	3.2.2 BEWEHRUNG	3.2.3 DICHTHAUT	3.2.4 WÄRMESISOLATION	3.2.5 KÜHLSYSTEM	3.2.6 FUNDAMENT	3.2.7 DURCHFÜHRUNGEN	3.2.8 ABSCHLÜSSE	3.2.9 INSTUMENTIERUNG
<ul style="list-style-type: none"> - Behälterbauweise - Monolith. Betonbau - Montagebetonbau - Skelettbau - FI-Bau mit Blöcken - FI-Bau mit Schalen - Behälterform - stehender Zylinder - flacher Zylinder - Kugelhülle - Betonmaterial - Betonarten - Kiese - Zuschlag - Schwerbeton - Leichtbeton - Magnetsilikatbeton - Fliesenbeton - Barytbeton - Liniarbeton - Monolithbeton - Serpentinbeton - Betongüte - Beton B II - (B_h 350, 450, 550) - Behälteranordnung - integrierte Anordn. - aufgetragene Anordn. - nichtintegr. Anordn. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bewehrungsanfordernis - mit Bewehrung - ohne Bewehrung - Bewehrungsarten - schlaife Bewehrung - vorgespannte Bewehrung - Stahlorten - Betonschleife - Spannschleife - wärmegewaltvermindert - kallegzogen - Spanngliederführung und - Spannsystem - Vertikalvorspannung - geradlinige Spanng. - seitig gekrümmte - polygonale Spanng. - Linienvorspannung - Mischvorspannung mit - lückenloser Anordnung - Mischvorspannung mit - abschnittsweise Anordn. - Mischvorspannung mit - Spannschrauben - Aufweitvorspannung - Radialvorspannung - Fahrvorspannung - polygonartige Spanng. - Ringvorspannung - Sonderverfahren - Spanverfahren - Vertikalvorspannung - einschlägige Firmen - Horizontalvorspannung - einschlägige Firmen - Verankerungssysteme - Zeitpunkt des Vorspannens - vor dem Betonverhärten - nach dem Betonverhärten - Bewehrungsbereiche - Spannglieder für die - zylindrische Wand - Spannglieder für Deckel - und Boden - Spanngliedverbund - vollter Verbund - teilweiser Verbund - kein Verbund - Vorspanngrad - volle Vorspannung - beschränkte Vorsp. - teilweise Vorsp. 	<ul style="list-style-type: none"> - Linienanfordernis - mit Linier - ohne Linier - Temperaturbeaufschlag. - kalter Linier - heißer Linier - Verankerungsmöglichk. - festverankert - flabschwimmend - schwimmend - Linierintegrität - Streifenlinier - integrierter Linier - Verfertigungsgrad - teilvorfertigung - weitgehendende Vorf. - lokale Vorfertigung 	<ul style="list-style-type: none"> - Isolationsanfordernis - mit Isolation - ohne Isolation - Anordnung der Isolant. - vor dem Linier - hinter dem Linier - Isoliermaterial - Metall - Metallfolie - Metallzelle - Metallgewebe - Metall Gas - Metallfolie und - Sticksstoffgas - Beton - Blimbeton - Styroporbeton - Gussbeton - Blähton - Bläschlieferbeton - Aschesinterbeton - Keramik - Kugelförmige keram. - stische Harzpartikel - (St₂-basis, Al₂O₃-bas) - Faser - Kiesel - Kerlake - Keramik und Faser - Keramik-Faser-Matten - Temperaturbeaufschlag. - Isolierungen für niedr. - Temperaturen - Einlagenisolierung - Isolierungen für mittl. - Temperaturen - Zweilagenisolierung - Isolierungen für hohe - Temperaturen - Dreilagenisolierung 	<ul style="list-style-type: none"> - Kühlsystemanfordernis - mit Kühlung - ohne Kühlung - Anbindung des Kühlsyst. - liniengebundenes Kühls. - betonintegriertes Kühls. - linier- und betonungebundenes Kühlsystem - Kühlrohrform - Vierkantröhr - U-förmiges Röhr - rundes Röhr - halbrundes Röhr - Kühlsystemanordnung und - Redundanz - eintrache Anordnung - mehrtrache Redundanz - Boden - Deckel - zylindrischer Bereich - durchführungen - Kühltrohrführung - waagrecht - senkrecht - schräg 	<ul style="list-style-type: none"> - Gründungsform - Flachgründung - Pfahlgründung - Plattgründung - Sondergründung - Ausführung - Einzel Fundament - Streifenfundament - Plattfundament - Fundamentform - Vortief Fundament - Ringfundament - Sternfundament 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturbeaufschlag. - niedrig temperaturbeaufschlagte - hoch temperaturbeaufschlagte - Konstruktion - Einzelleitung - Doppelleitung - Material - Stahl - Form - runde Basisfläche - Erfordernis - Arten 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturbeaufschlag. - kalter Deckel - heißer Deckel - Material - Stahl - Spambeton - Abschlusform - gerade Abschlüsse - gekrümmte Abschlüsse - zylindrischer Mantel - keilförmiger Mantel - Bauweise - Vollmaterial - Mehrlagenschicht - Monolith - Fertigteile - Konstruktion - Stahlbetondeckel - Stahlbetondeckel - Spambetondeckel 	<ul style="list-style-type: none"> - Zu messende physikalische Größen - Verformung - Spannung - Temperatur - Feuchtigkeit - Heißort - Beton - Linier - Panzerrohr - Kühlsystem - Spannkabel - Containment - Meßverfahren - Beton-Dehnungsaufnehmer - Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmer - Hochtemperatur-Megafachnehmer - Kompensationsmeßverfahren mit gesteuerten Düsen - Kraftmeßbojen - magnetische Kraftaufnehmer - Hydraul. Kompensationsmeßverfahren - Thermoelemente - kapazitive Verfahren - Leckagedetektorsystem - Hygrometer

Bild 3.1: Möglichkeiten der Komponentengestaltung bei SBB

3.2.1 Betonhüllen der Behälter

3.2.1.1 Behälterbauweisen

Im SBB-Bau unterscheidet man generell zwischen monolithisch aufgebauten und aus Fertigteilen zusammengesetzten Gebilden. Bei der monolithischen Betonbauweise kennt man im Gegensatz zur Montagebauweise keine speziellen Bauarten (Bild 3.2). Die Montagebauweise kann dabei in den Skelettbau, den Fertigteilbau mit Blöcken und den Fertigteilbau mit Schalen eingeteilt werden.





Nr.	Behälterbauweisen	Bauarten	Bildliche Darstellung
1	Monolithischer Betonbau	Betonguß	
2	Montage-Betonbau	Skelettbau	
		Fertigteilbau mit Blöcken	
		Fertigteilbau mit Schalen	

Bild 3.2:
Bauweisen
für SBB

Monolithische Betonbauweise des SBB: Bei dieser Bauweise übernimmt der Beton die tragende und raumabschließende Funktion zugleich. Die Behälterherstellung beginnt mit dem Einbringen der schlaffen Bewehrung für den Behälterboden, nachdem das Ringfundament erstellt ist. Das Verfüllen des Behälterbodens schließt sich an. Voraussetzung für das Hochziehen der Zylinderwand aus Beton ist wie beim Boden der vorangehende Einbau der schlaffen Bewehrung. Um die Eigen- und Temperaturspannungen infolge Hydratation (Ausdampfen des Wassers aus dem Beton infolge Hitzeeinwirkung) in Grenzen zu halten, erfolgt das Betonieren der Zylinderwand in mehreren Schüssen. Dabei werden zwischenzeitlich die Panzerrohre und der Liner eingebaut, auf die jedoch an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll. Das Gießen des Behälterdeckels aus Beton erfolgt in Analogie zum Behälterboden.

Montagebauweise aus Beton des SBB: Ludewig /92/ definiert die Montagebauweise als eine Bauweise, bei der vorgefertigte Teile verlegt und zu einer Konstruktion zusammengesetzt werden. Vorteilig gegenüber der monolithischen Bauweise scheint die räumliche und zeitliche Verlagerung komplizierter und zeitaufwändiger Behälterarbeiten von der Baustelle in die Fabrik.

Im einzelnen sind das folgende Montagebauweisen für SBB:

Skelettbau: Hierbei wird die Behälterkonstruktion funktional in das tragende Skelett aus Balken und Stützen und in die raumabschließenden Bauteile geteilt. Eine denkbare Ausführungsvariante wäre dabei, zunächst die Stahlbetonfertigteile mit Stahlblechen zu ummanteln und dann in das Behälterskelett einzuhängen. Die Fugen können dichtgeschweißt und der ganze Behälter vorgespannt werden.

Fertigteilbau mit Blöcken: Wie bei der monolithischen Betonbauweise übernimmt auch hier der Beton die tragende und raumabschließende Funktion. Die Fertigteilkonstruktion entsteht durch das Aneinanderreihen von Betonblöcken, deren Fugen nach der Montage mit Mörtel ausgefüllt werden, so daß im Endzustand ein monolithischer Körper entsteht.

Fertigteilbau mit Schalen: Anstelle von vorgefertigten Blöcken werden hier vorgefertigte Schalenelemente verwendet. Der Aufbau der zylindrischen Wand erfolgt derart, daß diese aus mehreren, einzelnen konzentrischen Betonschalen in radialer Richtung und aus mehreren, aufeinandergesetzten Betonschalen in axialer Richtung zusammengesetzt wird. Die Spalten zwischen den Schalen werden wieder mit Mörtel verfüllt und der ganze Behälter vorgespannt.

3.2.1.2 Behälterformen

Die Behälterform des SBB wird durch den Körper, die Hauptabmessungen und die Basisfläche charakterisiert (Bild 3.3). Von den vielen Möglichkeiten zur Formgestaltung von SBB sind hauptsächlich der Zylinder und die Kugel zur Anwendung gekommen. Beispiele dafür sind die KKW Dungenes B, Marcoule G2, G3, THTR Uentrop (alle Zylinderbehälter) und Wylfa (Kugelbehälter).

Der kugelige Behälter stellt in statischer Hinsicht die optimale Behälterform dar; da jedoch bei der Ausführung und Vorspannung große Schwierigkeiten auftreten, hat sich in letzter Zeit aus bautechnischen wie wirtschaftlichen Gründen der stehende Zylinder mit Zylindercore und kreisförmiger Basisfläche von Behälterperipherie und -core als vorteilhaft erwiesen. Die Wahl der kreisförmigen Basisfläche beruhte auf Parameterstudien zur optimalen Anordnung von Leistungsreaktoren mit Kugelhaufenbestückung /8/. Dort hat sich gezeigt, daß bei elliptischer und rechteckiger Behälterbasisfläche die Wirkung der Vorspannung und die Wirtschaftlichkeit durch erhöhten Bewehrungsverbrauch an Spann- und Schlaffstahl sinkt.

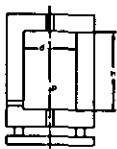
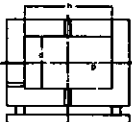
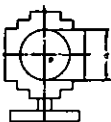
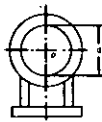




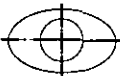
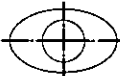
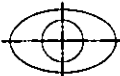



Behälterform				
Beschreibung	Stehender Zylinder mit Zylindercore	Liegender Zylinder mit Zylindercore	Flacher Zylinder mit Kugelcore	Kugelhülle mit Kugelcore
Basisfläche von Behälterperipherie und Behältercore	 Kreis - Kreis	 Kreis - Kreis	 Kreis - Kreis	 Kreis - Kreis
	 Ellipse - Kreis	 Ellipse - Kreis	 Ellipse - Kreis	
	 Rechteck - Kreis	 Rechteck - Kreis	 Rechteck - Kreis	
Ausführung	Dungenes B	Marcoule G2, G3	Wylfa	

Bild 3.3:
Möglichkeiten zur
SBB-Form-
gestaltung

3.2.1.3 Betonmaterialien für SBB

Bei den Betonarten wird nach der Zusammensetzung, bei den Betongüten nach den Festigkeitsklassen unterschieden.

3.2.1.3.1 Betonarten

Beton ist ein Gemisch aus Zement, Zuschlag und Wasser, bei dem als Baustoff zur Neutronenabschirmung die Zuschlagstoffe entscheidenden Einfluß haben. Entsprechend dieser Zuschlagsstoffe teilt Ludwig /92/ die Betone in folgende Arten ein (Bild 3.4).

Betonart	Gefüge	Zuschlagstoffe	Rohdichte kg/dm ³
Schwerbeton	geschlossenes, dichtes Gefüge, wird jedoch selten hergestellt	schwere Zuschlagstoffe, wie Schwerstpat, Stahlschrot, Hämatit, Magnetit, Ilmenit, Baryt, Limonit, Serpentin	3,0...5,0
Normalbeton	geschlossenes, dichtes Gefüge; wird am häufigsten hergestellt	Sand, Kies, Splitt, Schotter, Hochofenschlacke usw.	sandreicher Beton 2,0...2,1 gewöhnlicher " 2,1...2,5 Massenbeton 2,5...2,8
Leichtbeton (Isolierbeton)	poriges Gefüge. Hauptanwendungsgebiet ist die Montagebauweise. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Leichtbetonarten	porige Zuschlagstoffe, wie Hüttenbims, Porensinter usw., bestimmte Kornauswahl (Einkornbeton). Zusatz eines Treibmittels, wie schaum- oder gasbildende Stoffe	besonders wärmedämmende mit mäßigen Festigkeiten bis 0,8 mittelfeste mit guten wärmedämmenden Eigenschaften 0,8...1,4 festere mit beschränkt wärmedämmenden Eigenschaften 1,4...1,6

Bild 3.4:
Haupt-
gruppen
der Be-
tonarten

Als Baustoff für SBB kommen nur Betone mit einer Rohdichte größer $2,0 \text{ kp/dm}^3$ in Frage, also Normal- und Schwerbeton, da das Absorptionsvermögen gegenüber der γ -Strahlung durch eine hohe Betondichte positiv beeinflusst wird. Die Zusammensetzung solcher Betone für SBB kann aus DIN 25 413 /4/ entnommen werden, die eine Klassifikation von Betonen nach Elementanteilen bei Verwendung zur Neutronenabschirmung vornimmt (Bild 3.5).

	Betontyp	Elementanteil in % Trockenmasse						Rohdichte t/m^3
Normal- beton	Kiesbeton	O + C 53	Si 33	Ca 7	Al 7			2.0-2.35
	Hämatit- u. Magnetitbeton	O + C 33	Si + Al 8	Ca 4	Fe 55			3.6
Schwerbeton	Ilmenitbeton	O + C 30	Si + Al 7	Ca 3	Fe 35	Ti 25		3.5
	Barytbeton	O + C 30	Si + Al 5	Ca 3	S 12	Ba 50		3.3
	Limonitbeton	O + C 33	Si + Al 8	Ca 4	Fe 55			3.0
	Serpentinbeton	O + C 45	Si + Al 18	Mg 30	Fe 7			3.2

Bild 3.5:
Zusammensetzung
der Betone für SBB

Ein typischer Vertreter des Normalbetons ist der Kiesbeton, solcher für Schwerbeton der Hämatit- und der Magnetitbeton, der Ilmenit-, der Baryt-, der Limonit- und der Serpentinbeton. Häufigen Einsatz bei SBB findet der Kiesbeton, der seit langer Zeit Anwendung bei graphitmoderierten Reaktoren findet.

3.2.1.3.2 Betongüten

Bild 3.6 zeigt die nach DIN 1045 /6/ vorgenommene Betongruppierung nach Festigkeitsklassen gemäß der Druckfestigkeit β_w (Prismenfestigkeit des Betons), wobei die Norm die unterschiedlichen Festigkeitsklassen in zwei Betongruppen B I und B II zusammenfaßt. B I steht für die Betonfestigkeitsklassen Bn 50 bis Bn 250 und B II ist eine Kurzbezeichnung der Betone Bn 350 bis Bn 550.

1 Beton- gruppe	2 Festigkeitsklasse des Betons	3 Nennfestigkeit β_{wN} kp/cm^2	4 Serienfestigkeit β_{wS} kp/cm^2	5 Anwendung	
				allgemein	speziell
Beton B I	Bn 50	50	80	Nur für unbewehrten Beton	
	Bn 100 Bn 150 Bn 250	100 150 250	150 200 300		
Beton B II	Bn 350 Bn 450 Bn 550	350 450 550	400 500 600	Für unbewehrten und bewehrten Beton	Reaktor-druckbehälter

Bild 3.6:
Festigkeiten
des Betons und
seine Anwendung

Nach einer Studie für einen Normentwurf "Reaktordruckbehälter aus Spannbeton" /7/ ist für SBB ein Beton mindestens der Festigkeitsklasse Bn 350 zu verwenden. Welche physikalischen Eigenschaften der in der Reaktortechnik verwendete Beton B II der Festigkeitsklasse Bn 550 hat, geht aus Bild 3.7 hervor.

	Eigenschaft	Bezeichnung	Dimension	Wert
1	Zugfestigkeit	σ_z	kp/cm ²	35
2	Spaltzugfestigkeit	σ_{zs} 28s	kp/cm ²	32
3	Druckfestigkeit	β_{ws}	kp/cm ²	600
4	Scherfestigkeit	τ	kp/cm ²	1
5	Elastizitätsmodul	E	10 ⁵ kp/cm ²	3,9
6	Schubmodul	G	10 ⁵ kp/cm ²	0,17
7	Querdehnzahl	μ	-	0,17
8	Flächenpressung	p	kp/cm ²	90
9	Dichte	ρ	kp/dm ³	2,35
10	Lin. Wärmedehnungskoeff.	α_T	10 ⁻⁶ /°C	10
11	Wärmeleitzahl	λ	kcal/hm ⁰ C	1,1
12	Kriechzahl	ϵ_s	-	1,0
13	Schwindmaß	φ_t	10 ⁻⁴	1

Bild 3.7:

Materialwerte
eines SBB-Betons
Bn 550

3.2.1.4 Behälteranordnungen

Die Anordnung des Primärkreises, vor allem aber die der Wärmetauscher, hat besonderen Einfluß auf die Form und Größe eines SBB einerseits und auf die angrenzenden KKW-Komponenten andererseits.

In der nachfolgenden Betrachtung werden nur behälterspezifische Gesichtspunkte verglichen, ohne näher auf die peripheren einzugehen. Ferner wird schon aus erwähnten Gründen auf den Kugelbehälter verzichtet, so daß nur Zylinderbehälter für mögliche Anordnungskonzeptionen von SBB in Bild 3.8 aufgenommen wurden.

Die aufgelisteten neun Anordnungsmöglichkeiten lassen sich global in drei Gruppen einteilen:

Integrierte Anordnung primärkreistragender Komponenten im SBB
(Behälteranordnungen 1, 2, 3 und 4).

Aufgelöste Anordnung primärkreistragender Komponenten, die
betonummantelt sind (Behälteranordnungen 5, 6, 7 und 8).

Nicht integrierte Anordnung primärkreistragender Komponenten
und ohne zusätzliche Betonummantelung (Behälteranordnung 9).

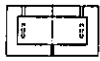

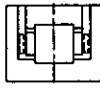
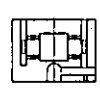

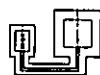
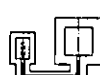
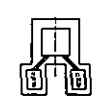
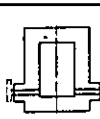
	Behälter-anordnung	Bildliche Darstellung	Konzeption	Beton-volum.	Spannst.-menge	Wärmeisol.-menge	Umbauter Raum
Integrierte Anordnung	1	Integr. Anordnung-Einkaverne mit horizontaler DE-Anordnung 	THTR-300	100%	100%	100%	100%
	2	Integr. Anordnung-Einkaverne mit vertikaler DE-Anordnung 	EDF 4, Bugey 1	64%	61%	89%	71%
	3	Integr. Anordnung-Multikaverne mit DE in der Behälterwand (pod boiler) 	Hartle-pool, Heysham, HTR 1160	98%	58%	135%	84%
	4	Integr. Anordnung-Multikaverne mit DE und Turbine in der Behälterwand 	HHT-1080-INT	120%	68%	155%	100%
Aufgelöste Anordnung	5	Aufgelöste Anordnung mit Direktanschluß von Corebehälter und Satellitenbehälter 	HTR-K-3000 BASF	62%	51%	98%	80%
	6	Aufgelöste Anordnung mit U-Anschluß des Corebehälters und der Satellitenbehälter 	HTR-K-3000	70%	51%	100%	75%
	7	Aufgelöste Anordnung mit U-Anschluß des Corebehälters und der Satellitenbehälter 	HTR-K-3000	70%	51%	100%	75%
	8	Aufgelöste Anordnung mit Vertikalanschluß von Corebehälter und Satellitenbehältern 	HTR-K-3000	58%	51%	98%	70%
nichtintegrierte Anordnung	9	Nichtintegrierte Anordnung mit horizontalem Anschluß von Corebehälter und Satellitenbehälter 	PR500	42%	37%	68%	50%

Bild 3.8: Anordnungsmöglichkeiten von SBB

Parametrische Behälterstudien /8/ führen zu folgenden Vergleichswerten:

Bei der integrierten Lösung mit der Wärmetauscher(WT)-Anordnung seitlich des Cores, Behälterkonzeption 1, (z.B.Konzeption THTR Uentrop) tritt der größte Innendurchmesser auf. Dies erfordert die größte Vorspannung und eine maximale Stärke der Abschlußplatten. Eine Extrapolation dieser Behältergröße auf eine höhere Reaktorleistung ist ungünstig, da die Behälterabmessungen bei einem KKW der 1300 MW_{e1}-Klasse sehr groß würden.

Neben den Vorteilen des kleineren Spannstahlbedarfs und der kleineren Plattenstärke weist die integrierte Behälterkonzeption 2 (Konzept EDF 4 und Bugey) noch den wesentlich geringeren,umbauten Raum auf, und stellt in statischer

und wirtschaftlicher Hinsicht eine gute Lösung dar. Die Nachteile ergeben sich durch das hohe Reaktorgebäude bzw. hohe Containment und durch die Schwierigkeiten bei der Reparatur und dem Auswechseln der WT.

Diese Nachteile der behinderten Reparatur der WT werden durch die Konzeptionen 3 und 4 gemildert, bei denen die WT in der Zylinderwandung des Behälters angeordnet sind (Konzeptionen Hartlepool, Heysham, HTR 1160 und HHT 1080-INT). Nachteilig anzusehen ist der höhere Bedarf an schlaffer Bewehrung und die große Fläche, die mit Liner und Wärmeschutzsystem zu versehen ist.

Anstelle von WT findet man bei der Konzeption 4 Rekuperatoren (R) und Vorwärmer (V); im Behälterboden sind radial verlaufende Stollen zur Aufnahme der Helium beaufschlagten Turbine vorgesehen. Durch die im SBB integrierte Heliumturbine vergrößern sich die Abmessungen. Damit verbunden ergeben sich höhere Mengen an Beton, Linerfläche und Isoliermasse.

SBB mit nicht im Corebehälter integriertem System führen zu kleineren Behälterabmessungen, benötigen jedoch zusätzlich Betonbehälter für die WT (Konzeptionen 5, 6, 7 und 8 wie z. B. beim HTR-K 3000). Dies führt zu einer günstigen Extrapolation von Behälterabmessungen, da jeder Behälter relativ klein baut. Durch die gute geometrische Zugänglichkeit werden evtl. Reparaturen an WT und Liner wesentlich erleichtert.

Die Konzeption 9 weist den Vorteil der günstigsten Zugänglichkeit der WT durch räumliche Trennung auf, die auch bei den Konzeptionen 5 bis 8 vorgefunden wird. Durch den fehlenden Betonmantel für die WT führt dies zu den kleinsten Behältermengen an Beton, Schlaff- und Spannstahl sowie Liner- und Isolierfläche und unbehinderter Reparatur für WT und Heißgasleitungen. Der geringstmögliche Aufwand zur Demontage des SBB scheint hier vorzuliegen.

3.2.2 Behälterbewehrungen

3.2.2.1 Notwendigkeit der Bewehrung und Bewehrungsarten

Für den Bau von SBB für Reaktoren ist die Überdrückung von Zugspannungen (Kompensation der Zugspannungen durch vorher aufgebrachte Druckspannungen), die durch die Bau- und Betriebszustände des Behälters ausgelöst werden, eine schlaaffe und eine vorgespannte Bewehrung notwendig.

Dabei nimmt die vorgespannte Bewehrung, kurz auch Vorspannung genannt, den größten Teil von Zugspannungen auf und verbleibende Zugspannungen werden von der schlaffen Bewehrung, auch Armierung genannt, übernommen bzw. abgebaut. Diese verbleibenden Zugspannungen konzentrieren sich im SBB vorzüglich an den Durchführungen, den Vouten (kreisförmige Übergänge des zylindrischen Behälterteils zu Deckel und Boden auf der Coreinnenseite) und der Innenseite der Behälterwandung, so daß an diesen Stellen eine Verdichtung von schlaffem Bewehrungsstahl vorzufinden ist.

3.2.2.2 Bewehrungsstahlsorten

Schlaffer Bewehrungsstahl (Betonstahl): Die eingesetzten Bewehrungsstähle müssen die in DIN 1045 /7/ angegebenen Festigkeitsklassen haben, sowie in Form, Durchmesser und Kennzeichnung der DIN 488 entsprechen.

Vorgespannter Bewehrungsstahl (Spannstahl): Zum Einsatz von Spannstählen für SBB dürfen nur allgemein bauaufsichtlich zugelassene Spannstähle verwendet werden. Die in der Bundesrepublik Deutschland zugelassenen Spannstähle teilen sich entsprechend der Herstellung, der chemischen Zusammensetzung und der Abmessung in drei Gruppen ein /9,10/ Bild 3.9.




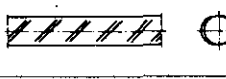
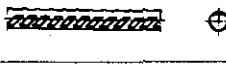
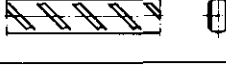

Nr.	Querschnittsform	Erläuterung
1		Warmgewalzt, gereckt und angelassen, rund, glatt, \emptyset bis 36 mm (Gewinde aufgerollt)
2		Wie vor, rund mit beidseitig aufgewalzten Gewinderippen, \emptyset bis 36 mm
3		Kaltgezogen bzw. vergütet, rund, \emptyset bis 12,2 mm
4		Vergütet, rund, mit Rippen, \emptyset bis 12 mm
5		Kaltgezogen, rund, profiliert, \emptyset bis 7,5 mm
6		Vergütet, flach, gerippt, Querschnitt bis 114 mm ²
7		Kaltgezogen (Litze) 7 Drähte verseilt, Einzeldraht \emptyset bis 5,0 mm

Bild 3.9:
Gebräuchliche
Spannstahlsorten

Diese Gruppen werden von warmgewalzten Stählen, vergüteten Stählen und kaltgezogenen Drähten und Litzen gebildet.

Warmgewalzte Stähle: Sie werden mit rundem Querschnitt bis 36 mm Ø in beschränkten Längen hergestellt. Gebräuchliche Sorten werden durch Recken und Anlassen nachbehandelt. Die Stäbe werden z. Zt. rund, glatt und mit beidseitig aufgewalzten Rippen in den Stahlgüten St 85/105 kp/mm^2 und St 110/125 kp/mm^2 hergestellt.

Vergütete Drähte: Der warmgewalzte Draht wird durch nachträgliches Erwärmen, Abschrecken und Anlassen vergütet. Er wird hauptsächlich mit rundem Querschnitt, glatt und mit Rippen bis zu 16 mm Ø und mit rechteckigem Querschnitt mit Rippen hergestellt. Die gerippten Stähle werden als St 135/150 kp/mm^2 und z. Zt. wie die glatten Stähle mit der Güte St 145/160 kp/mm^2 geliefert.

Kaltgezogene Drähte und Litzen: Das warmgewalzte Material wird durch Düsen aus Hartmetall stufenweise kaltgezogen und anschließend angelassen. Außer glatten Drähten bis 12,2 mm Ø werden profilierte Drähte bis 7,5 mm Ø hergestellt. Je nach Abmessung und Oberflächenform schwanken die Festigkeitswerte von St 140/160 kp/mm^2 bis St 160/180 kp/mm^2 .

3.2.2.3 Spanngliedführungen und Vorspannsysteme

SBB werden in vertikaler und horizontaler Richtung mittels Spannglieder vorgespannt. Welche Möglichkeiten der Spanngliedführungen in gebauten SBB verwirklicht bzw. denkbar sind, gibt Bild 3.10 wieder.

Die Vertikalvorspannung kennt geradlinige, stetig und polygonartig gekrümmte Spannglieder in Form von Einzel- und Bündelspanngliedern. Die geradlinigen Spannglieder werden im herkömmlichen Spannbetonbau meist für das Spannen vor dem Erhärten des Betons im sog. Spannbett (spezielle Vorrichtung dazu) benutzt. Im Spannbetonbau finden sie mehr und mehr Verwendung durch die Vorteile des geringeren Spannkraftverlustes infolge kleinerer Reibungskräfte und der einfacheren, bautechnischen Ausführung, wie es die Anwendung der in jüngster Zeit gebauten oder im Bau befindlichen SBB der KKW Hartlepool, Heysham und THTR Uentrop zeigt.

Die stetig und polygonartig gekrümmten Spannglieder dienen dazu, sich einem wechselnden Momentenverlauf anzupassen oder die Übertragung der Querkkräfte zu erleichtern und werden vorzugsweise für das Spannen nach dem Erhärten des Betons verwendet. Konzeptionen dafür findet man in den SBB der KKW Wylfa, EDF 3 und EDF 4.

Für die erwähnten Vorspannsysteme der vertikalen Vorspannung stehen heute Einzelspannglieder mit Bruchlasten bis zu 1600 Mp zur Verfügung /22/. Die Spanngliedergröße hängt von wirtschaftlichen und konstruktiven Gesichtspunkten ab.














	Spanngliederführung	Vorspannsystem	Bildliche Darstellung
1	Vertikal-Vorspannung	<ul style="list-style-type: none"> - geradlinige Spannglieder - stetig gekrümmte Spanngl. - polygonartig gekr. Spanngl. 	  
2	Horizontal-Vorspannung	<ul style="list-style-type: none"> - Linsenvorspannung - Wickelvorspannung mit lückenloser Anordnung - Wickelvorspannung mit abschnittsweiser Anordnung - Wickelvorspannung mit Spannschuhen - Aufweitvorspannung - Radialvorspannung - Faßreifenvorspannung - Polygonartige Spannringvorp. - Sonderverfahren 	        
3	Schräge Vorspannung	- Spiralvorspannung	

Bild 3.10:
Spanngliederführungen
und Vorspannsysteme
bei SBB

Die bekanntesten Horizontalvorspannsysteme sind folgende:

Bei der Linsenvorspannung sind horizontale Ringkabel verschiedener Umschlingungswinkel und Anordnungen der Verankerungsstellen konzipiert. Die Spannkabel befinden sich dabei innerhalb der Behälterwand und bilden einen Umschlingungswinkel von 220° bis 270° . Die Verankerung erfolgt in lotrechten Lisenen, an denen sich die Spannkabelenden abstützen. Die wesentlichen Nachteile sind zu sehen in den Spannkraftverlusten durch Reibung, dem höheren Spannstahlbedarf infolge der durch die Lisenen erforderlichen Überschneidungen, den hohen Kosten der Spanngliederverankerungen, den großen Bedarf an schlaffer Bewehrung zur Aufnahme von Spaltzugkräften in den Verankerungsbereichen, der größeren Wandstärke des zylindrischen Behälterteils, was zu einem größeren Platzbedarf im Reaktorgebäude führt und in den Erschwernissen bei der Schalung der

Lisenen und beim Einfädeln der Spannkabel. Der Vorteil zeigt sich in der Verwendung von Spannkabeln großer Spannkraft. Die Konzeption einer solchen Vorspannung findet man im SBB THTR Uentrop.

Beim Faßreifenverfahren wird ein Stahlring auf einen leicht konischen Behälter aufgeschlagen. Es arbeitet verankerungslos und ermöglicht eine ziemlich gleichmäßige Spannungsverteilung. Dieses Vorspannsystem arbeitet nur für Behälter mit einer Vorspannkraft von 1000 t/m wirtschaftlich. Hochbelastete SBB müssen jedoch mit Spannkraften bis zu mehreren 1000 t/m-Behälterhöhe vorgespannt werden /11/.

Bei der Montagebauweise der Betonhülle mit einzelnen Blöcken kommt u. a. das Aufweitspannverfahren der Fa. Dyckerhoff & Widmann zum Einsatz. Hierbei werden die halbkreisförmigen Umfangsstäbe um die Betonblöcke herumgelegt und mit Muffen zu end- und spannungslosen Ringen verschraubt. Bei gleichmäßig verschiebbaren Betonblöcken wird mittels eines in die Ringmitte eingebrachten Druckkissens der gesamte Ring auseinandergepreßt und durch die äußere Ringbewehrung unter Vorspannung gesetzt /12,13/. Nachteilig ist dabei, daß der durch das Druckkissen erzeugte Druck auf die Betonkonstruktion so lange aufrecht erhalten werden muß, bis der in den Fugen eingebrachte Mörtel ausreichend erhärtet ist. Diesen Nachteil umgeht das Aufweitspannverfahren mit entgegengesetzt verschiebbaren Betonblöcken. Zwischen jedem keilartigen, trapezförmigen Betonblock ist ein weiterer in umgekehrter Richtung angeordnet. Diese werden ebenfalls mit einem Druckkissen radial nach außen verschoben, setzen die Ringbewehrung unter Vorspannung und pressen sich so zwischen die stationär angeordneten Betonblöcke, daß sie sich nach Druckablaß durch Reibung sperren. Das Mörtelvergießen zwischen den einzelnen Betonblöcken entfällt/14/.

Ein weiteres Horizontalvorspannverfahren stellt die von der Fa. Philipp Holzmann polygonalgeführte, gewickelte Ringspannbewehrung dar, bei der jeder Spannkabelring polygonartig um die Behälterwandung herumgelegt und mit mehreren Zwischenverankerungen versehen ist /11,15/. Die Vorteile liegen in der Aufbringung großer Spannkraft, der Auswechsel- und Nachspannbarkeit der Spannkabel, der Möglichkeit des nachträglichen Verbundes, dem guten Schutz vor Temperatureinwirkung durch den Beton und dem Fortfall der beidseitigen Verankerungen und dem damit verbundenen Wegfall der Störung des Spannungszustandes in der Behälterwandung, da keine örtliche Krafteinleitung in die Behälterwand erfolgt.

Die Vorteile einer geringen Wandstärke, der Materialeinsparung und einer günstigen Spannkraftübertragung - die Übertragung der Zugkraft in den Ringgliedern erfolgt nicht als Druckkraft durch Reibungsverbund, sondern über radiale Druckkräfte, die in der Behälterwandung Ringdruckkräfte erzeugen - bringt das Radialspannverfahren von Dyckerhoff & Widmann /16,17,18/. Die Vorspannung basiert auf Ringspanngliedern, die in einem der Behälterinnenseite zugewandten Druckteil gelagert sind, an die die Behälterwandung durchsetzende Radialspannglieder angreifen und auf der Behälteraußenseite verankert sind. Die Vorspannung wird durch Anziehen der Radialspannglieder erzeugt.

Es gibt noch eine ganze Reihe von Sonderspannverfahren, auf die hier im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen wird, da sie für den SBB-Bau nicht so sehr interessant erscheinen und zum anderen den Rahmen der Arbeit sprengen würden.

Die Entwicklung führte auf Grund der vielen Nachteile oben aufgeführter Horizontalspannverfahren zu speziellen Wickelspannverfahren. Beim Wickelspannverfahren wird ein quasi endloser Draht unter Spannung stehend um die Behälterhülle mittels Maschinen gewickelt. Man kennt folgende Ausführungen:

Bei der lückenlosen Bewicklung wird direkt auf die Behälterwand gewickelt. Die Bewicklung erfolgt über die gesamte Behälterhöhe, wobei die Endplattenvorspannung durch eine Bewicklungsverstärkung im Abschlußplattenbereich wegfällt und Behälteröffnungen durch Aussparungen der Wicklungen im Öffnungsbereich und entsprechender Konzentration der Drähte um diese Öffnungen überbrückt werden. Die Wicklungen werden am Anfang und Ende in der Behälterwand verankert und zwischenbefestigt. Hauptsächlich wird dieses kontinuierliche Wickelverfahren bei Behältern mit nichtdurchbrochener Wandung angewendet.

Bei einem weiteren Wickelspannverfahren wird die Kabelspannung mittels Spannschuhen auf die Behälterwand übertragen /19/. Die Spanndrähte werden polygonartig geführt, was wiederum zur punktförmigen Krafteinleitung über die Spannschuhe in die Behälterwand führt. Durch die Spannschuhe entstehen die geringsten Unterschiede in der Belastung der einzelnen Drähte, Montagezeiteinsparungen werden durch das vorab Zusammensetzen der Drähte und Spannringe erzielt, und das Überstreifen der Spannringe über den Behälter ist einfach zu handhaben. Problematisch sind Schweißarbeiten an radialen Durchführungen wegen des begrenzten Raumes zwischen zwei Spanndrahtringen sowie durch Funkensprühen, das zur erheblichen, thermischen Einwirkung auf die Kabel führen kann. Zusätzlicher Aufwand für die Herstellung und Montage der Spannschuhe bedeuten einen

weiteren Nachteil. Ein Modellbehälter aus Spanngrauguß wurde mit diesem Vorspannsystem von der Fa. Siempelkamp gebaut /25,26/.

Den neuesten Stand der Technik stellt das abschnittsweise Bewickeln des Behälters dar, das den Nachteil der kontinuierlichen Bewicklung umgeht, nämlich den Einsatz vorzugsweise für nichtdurchbrochene Behälterwandungen. Hier werden die vorgespannten Litzen in Kanälen auf der Außenseite der Behälterhülle aufgebracht, wobei jede Lage an den Enden verankert wird. Kühlrohrenden und sonstige radiale Behälterdurchbrüche geringeren Durchmessers werden in den zwischen den Kanälen liegenden Wandrippen angeordnet. Die Fa. BBRV (Bureau BBR Ltd) arbeitet mit diesem System. Die Vorteile liegen in der konstruktiven Freizügigkeit, dem schnellen Arbeitsfortschritt, dem automatischen Arbeitsablauf, der sicheren Verankerung und dem einfachen Korrosionsschutz.

Bei der schrägen Vorspannung werden Einzelspannkabel in mehreren Lagen schraubenlinienförmig in oder auf der Behälterwand angeordnet und zwar von Lage zu Lage abwechselnd im Uhrzeiger- bzw. Gegenuhrzeigersinn. Beim Druckbehälter des britischen KKW Oldbury beträgt der Steigungswinkel der Spiralen 45° , bei den Behältern von Hinkley Point und Hunterston 37° /22/.

Die sich kreuzenden Spannglieder bewirken gleichzeitig eine horizontale und vertikale Behältervorspannung und sind jeweils oberhalb des Deckels und unterhalb des Bodens verankert. Dieses Vorspannsystem hat den großen Nachteil, daß es für moderne Wickelverfahren nicht geeignet ist.

3.2.2.4 Vorspannverfahren

Die Eignung des Spannverfahrens für RDB ist durch allgemeine, bauaufsichtliche Zulassung oder im Einzelfall nachzuweisen.

Für die Vertikalvorspannung von SBB haben sich in jüngster Zeit Einzel- oder Bündelspannglieder, für die Horizontalvorspannung aufgewickelte Litzen durchgesetzt.

Mit den verschiedenen Spanngliedern muß die für die vertikale Vorspannung notwendige Spannkraft erzeugt werden können. Da die Fa. BBRV das einzige Spannglied dieser Spannkraft hat, dessen Verwendung in der Bundesrepublik Deutschland bisher im Einzelfall zugestimmt wurde /20/, wird dieses Verfahren hier kurz erläutert. Das Spanngliedende mit den Einzeldrähten wird durch einen zylindrischen Stahlkörper geführt, und die Köpfe der Einzeldrähte werden derart angestaucht, daß die Spannkräfte über die Köpfe auf den Stahlkörper abgegeben werden

können. Der Stahlkörper besitzt ein Innen- und Außengewinde, durch die mittels einer Zugspindel die Spannglieder gespannt werden können. Für die THTR-Uentrop-Spannglieder sind solche mit einer theoretischen Bruchlast von 930 Mp empfohlen worden. Die Fa. Philipp Holzmann gibt an, bei ihrem Spanungsverfahren KA (Spannstahl SIGMA OVAL 40, Spannglied KA 240) mit Klemmverankerung /21/ Bruchlasten über 1500 Mp zu erreichen.

Bei den Wickelvorspannverfahren treten vier Spannverfahren in Konkurrenz zueinander. Das sind die Verfahren von BBRV, Gulf General Atomic Company, Philipp Holzmann AG und Taylor Woodrow Construction Ltd /20,22/.

Das einzige bisher eingesetzte Wickelspannverfahren ist das von Taylor Woodrow. Zur Anwendung kam es bei den vier SBB der britischen KKW Hartlepool und Heysham. Hierbei werden die Spanndrähte in vorgespanntem Zustand mittels einer Wickelmaschine um den Behälter in Wickelkanälen geführt. Die Vorspannung der Drähte wird nach dem Differentialprinzip erzeugt. Daher sind bei diesen Behältern 20 Wickelkanäle vorgesehen, die mit Spanndraht vom 5 mm Ø gefüllt werden. Jeder Wickelkanal enthält 35 Lagen, wobei jede Lage aus ca. 120 Spanndrahtwindungen besteht. Jede Einzellage wird separat verankert, jeder Spanndraht mit 2,3 Mp vorgespannt, was bei 35 Lagen zu einer Spannkraft von 9640 Mp und einer Mindestbruchlast von 13 900 Mp führt.

Das Vorspannverfahren von Gulf General Atomic Company ähnelt dem von Taylor Woodrow. Die Spannkraft wird über Raupenketten eingeleitet. Allerdings werden hier aus 7 Einzeldrähten bestehende Litzen von ca. 15 mm Ø um den Behälter gewickelt. Durch die stärkere Litze wird auch eine etwa 7-fach stärkere Spannkraft von 17,2 Mp erreicht als beim Einzeldraht von Taylor Woodrow. Die größere Spannkraft wirft Probleme bei der Spannkrafteinleitung und der Abmessungsbegrenzung der Maschine auf, die nur bei großen Behältern mit Durchmessern von ca. 21,4 m bis ca. 36,6 m und Höhen von ca. 21,4 m bis ca. 30,5 m einsetzbar ist. Sie wiegt 51 Mp. Bei einer Einsatzzeit von 16 Std/Tag dauert die komplette Behälterbewicklung ohne Anlageninstallation 10 Wochen. Bedingt durch die Aufhängung der Maschine am Deckel des SBB ist der Einsatz von nur einer Wickelmaschine zur gleichen Zeit möglich, während die Verfahren von Taylor Woodrow und das jetzt nachfolgend beschriebene von BBRV den Einsatz von mehreren Maschinen an einem Behälter gestattet.

Das von BBRV entwickelte Wickelspannsystem SW 8500 arbeitet mit 9,3 mm dicken Litzen, mit denen eine maximale Spannkraft pro Einzellitze von 8,5 Mp erzielt wird. Diese Spannkraft ist im Mittel um den Faktor 2,7 kleiner als bei Gulf

General Atomic, jedoch um den Faktor 2,5 größer als bei Taylor Woodrow. Die Wickelmaschine baut relativ klein, läuft auf zwei Schienen und wird über zwei Ketten angetrieben. Die Vorspannung wird über ein Vorspannrad aufgebracht, auf dem die Litze durch Klemmen gehalten wird. Der Wickelkanal kann bei einem Behälterdurchmesser von 30 m 90 cm betragen (Bild 3.11).

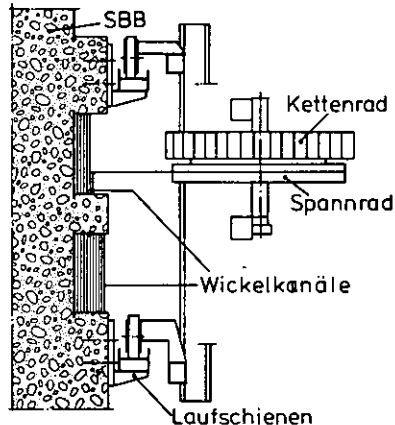


Bild 3.11:
Behälterwickel-
maschine BBRV

Zum Abschluß wird ein Wickelspannverfahren der Fa. Philipp Holzmann vorgestellt, das jedoch nicht zur Einsatzreife entwickelt wurde. Es existiert noch kein Prototyp einer Maschine. Dieses mit KA-Prisma-Verfahren bezeichnete Wickelspannverfahren verwendet gerippte, vergütete Drähte von 40 mm^2 Querschnitt und der Qualität Sigma Oval 40, ST 145/160, die viererweise polygonartig auf den nackten Behälter mittels einer Maschine gewickelt werden. Die Umlenkkraft wird punktweise in den Behälter eingeleitet. Die Drähte, mit denen man eine Vorspannkraft von 20 Mp erzielen kann, werden nicht spiralförmig, sondern horizontal mit sprungweiser Zeilenänderung um den Behälter gewickelt. Jeder Wickelabschnitt wird am Anfang, an mehreren Zwischenstellen und am Ende verankert.

3.2.2.5 Verankerungssysteme von Spannstählen

Die Spannstähle können unmittelbar im Beton des SBB verankert werden, wie es bei Verankerungen durch Krümmungen, durch Haft-, Reibungs- und Scherverbund bei Schlaufenverankerungen der Fall ist oder mittelbar mit Stahlteilen bei Verankerungen mit parallelen und konischen Gewinden, Keilen, Seilköpfen, Zieh-hülsen, angestauchten Köpfen, Schrägstreben, Tellerfedern, Klemmplatten und mit erhärtetem Einpreßmörtel. Näheres darüber kann der Literatur /9,23,24,95/ entnommen werden. So hat beispielsweise die vertikale Vorspannung von BBRV für den SBB THTR Uentrop eine Verankerung mit angestauchten Köpfen und beim Spannverfahren KA der Philipp Holzmann AG liegt eine Klemmplattenverankerung vor.

3.2.2.6 Zeitpunkt des Vorspannens

Prinzipiell kann vor oder nach dem Erhärten des Betons vorgespannt werden. Die Vorspannung vor dem Erhärten des Betons, die sog. Spannbettvorspannung, wird weitgehend bei vorgefertigten Elementen angewendet. Da SBB, abgesehen von Modellbehältern, bisher nur aus monolithisch erstellten Betonhüllen gebaut wurden, kommt nur die Vorspannung nach dem Erhärten in Frage.

3.2.2.7 Spanngliedverbund

Der Spanngliedverbund (Hüllrohrverpressung) erfolgte bisher voll, teilweise oder überhaupt nicht, wobei man in letzter Zeit die Bedeutung des vollen Verbundes mit der Erhöhung der Bruchsicherheit und des Korrosionsschutzes erkannt hat, wie es die Beispiele beim SBB THTR Uentrop und des SBB HTR 1160 zeigen.

3.2.2.8 Vorspanngrad

Generell unterscheidet man zwischen der vollen, beschränkten und teilweisen (partiellen) Vorspannung. Bei der beschränkten und teilweisen Vorspannung läßt man im Betonbauteil Zugspannungen zu, die bis zu 80 % der Betonzugfestigkeit erreichen können /9/. Die volle Vorspannung läßt sich bei SBB nicht verwirklichen, da infolge Betonkriechens Temperaturspannungen abgebaut werden. Hinzu kommen Kriechumlagerungen bei Belastungsänderungen. Dies führt zum Abbau der Vorspannung und erfordert immer einen gewissen Bedarf an schlaffer Bewehrung. Den Vorteilen der vollen Vorspannung wie geringe Gesamtverformungen am Behälter und geringer Gesamtstahlbedarf durch Verwendung hochfester Stähle stehen die Vorteile der teilweisen Vorspannung wie kleinere Stauchung der Stahlauskleidungen, geringere Temperaturbeanspruchung, geringere Behälterwandstärken und kein nachteiliger Einfluß der Spannkraftverluste gegenüber.

In der Bundesrepublik Deutschland sind die volle und die beschränkte Vorspannung zugelassen, die teilweise (partielle) jedoch nicht.

3.2.3 Dichthäute

Der Dichthaut, im angelsächsischen Sprachgebrauch mit Liner bezeichnet, kommen beim Einsatz in den SBB die folgenden Aufgaben zu: Dichten, Übertragen des Innendruckes vom Core auf den Betonstützkörper, Aufnehmen des Kühl- und Isoliersystems, Einschalen der Betonhülle innen, Verstärken der SBB-Durchbrü-

che und Bilden einer Wärmebrücke zwischen Isolierung und Kühlsystem. Die Komponenten Isolierung und Kühlsystem, die in der Literatur häufig zum Linersystem gezählt werden, werden hier von diesem losgelöst und gesondert in den Anschlußkapiteln 3.2.4 und 3.2.5 behandelt.

3.2.3.1 Notwendigkeit eines Liners

Aufgrund oben genannter Funktionen, die der Liner beim SBB zu erfüllen hat, ist dieser im kerntechnischen SBB-Bau notwendig. Auch bei den z.Zt. in der Entwicklung befindlichen RDB aus Spanngrauguß werden sowohl Liner im herkömmlichen Sinne /25,26/ wie auch höhertemperaturbelastete Liner bei sogenannten "warmgehenden RDB aus Spanngrauguß" /27/ eingesetzt, auf die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird.

Welchen speziellen Beanspruchungen ein Liner ausgesetzt ist, zeigt Bild 3.12, das die Beanspruchung des THTR-Liners wiedergibt.

Merkmal	Linerbeanspruchung
Temperatur	50...60 °C
Temperaturgradient	< 5°C/cm
Wärmefluß	1...2 kW/m ²
Neutronenfluß(E>0,1MeV)	< 10 ⁹ n/cm ² sec
γ-Fluß(E>1MeV)	< 10 ¹¹ γ/cm ² sec
Kumulierte n-Dosis	< 10 ¹⁸ n/cm ²
Dehnungen im Normalbetrieb	1000...1500 µD
max. Auslegungsdehnung	6000 µD
Spannungen im Normalbetrieb	5 kp/mm ²
Zyklenzahl	100/Lebensdauer

Bild 3.12:

Beanspruchungswerte des THTR Uentrop-Liners

3.2.3.2 Temperaturbeaufschlagung

Linerprinzip	kalter Liner	heißer Liner
Temperaturbeaufschlagung	50°C	260° - 300°C
Linerwerkstoff	-alterungsbeständiger Feinkornbaustahl (TT St E 29) -Austenit (X 5 CrNi 189)	-Austenit (X10 CrNiTi 18 9) -Ferrit/Martensit (X3 CrNi 13 4)
Linerkonzepte	-Steinmüller/Wessow -ABAL/Schweden	-FKL -KWUL -RFBL -Battelle

Bild 3.13:

Temperaturbeaufschlagung der Linerkonzepte

Je nachdem, ob die Isolierung vor dem Liner, also der dem Core zugewandten Seite oder hinter dem Liner, der dem Beton zugewandten Seite angeordnet ist, unterscheidet man zwischen kaltem und heißem Liner (Bild 3.13).

In Bild 3.14 ist eine Darstellung dieser Linerkonzepte gegeben, wobei noch der sogenannte warme Liner dargestellt wurde, eine Variante des heißen Liners.

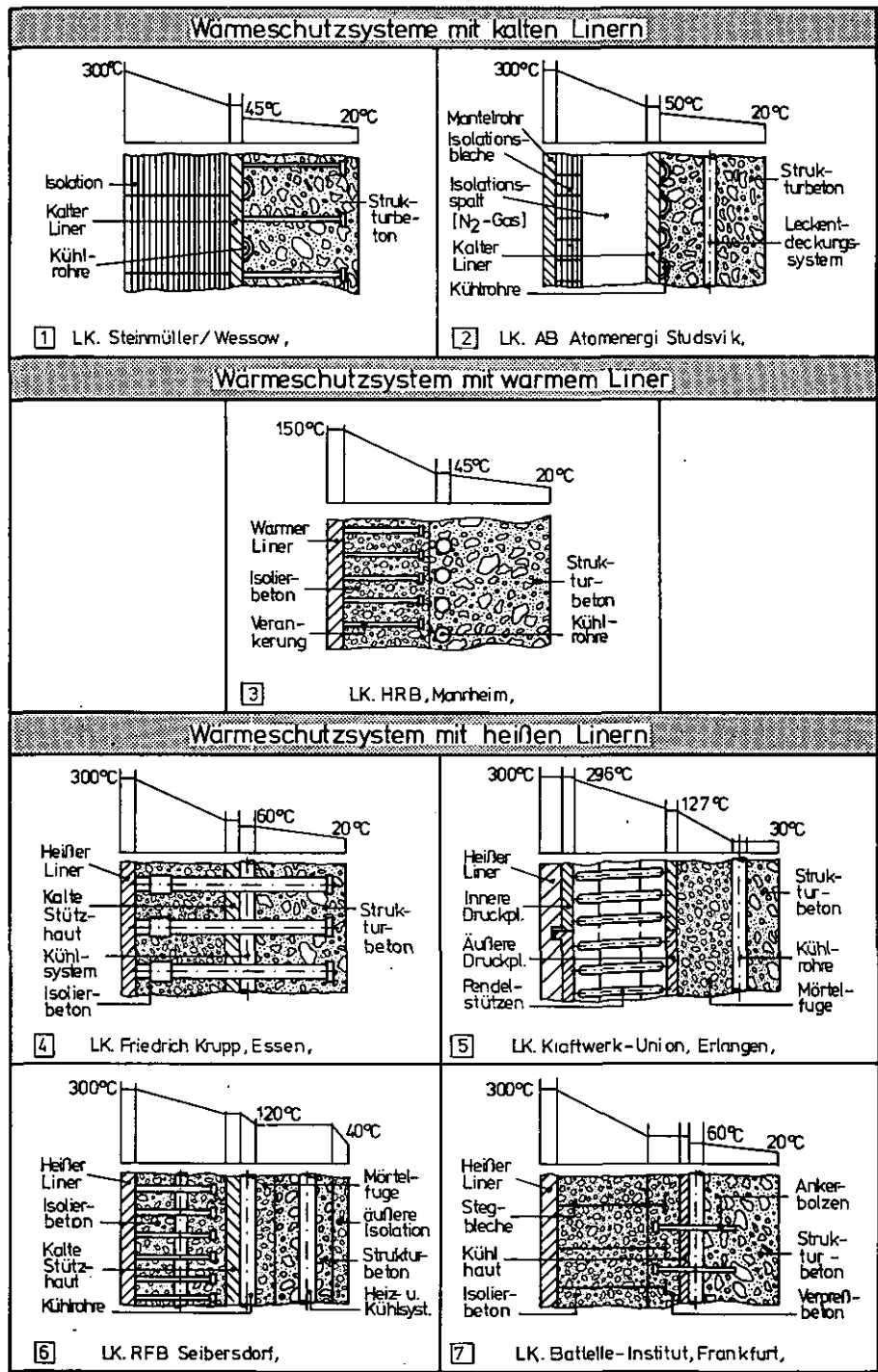


Bild 3.14: Linerkonzepte für SBB mit kaltem, warmem und heißem Liner

3.2.3.2.1 Wärmeschutzsysteme mit kalten Linern

Der Liner bildet im eingebauten Zustand in den meisten Fällen einen stehenden Blechzylinder, der auf seiner Außenseite aufgeschweißte Kopfdübelbolzen zur Festverankerung im Beton besitzt. Zwischen diesen Kopfdübelbolzen ist ein Kühlsystem in Form von aufgeschweißten Rohren angeordnet. Auf der Linerinnenseite wird als Temperaturschutz eine Isolation aufgebracht, die zusammen mit dem Kühlsystem die Liner- bzw. Betontemperatur auf maximal 50°C beschränkt. Zwei kalte Linerkonzepte werden hier kurz beschrieben:

Steinmüller/Wessow-Konzept (Bild 3.14.1): Das von der deutschen Firma Steinmüller in britischer Lizenz der Fa. Wessow im THTR Uentrop SBB verwirklichte Linerkonzept besitzt oben geschilderten klassischen Aufbau mit einem alterungsbeständigen Feinkornbaustahl der Güte TT St E 29 und einer Metallfolienisolierung. Vorteilhaft ist dabei die geringe Temperaturbelastung des Linermaterials, nachteilig die fehlende Möglichkeit der Inspektion, der Wiederholungsprüfung und der Reparatur des Liners, da zuerst die Isolation abgebaut werden muß.

Linerkonzept der AB Atomenergi, Studsvik, Schweden (Bild 3.14.2): Die am Beton anliegende Dichthaut bekommt keine unmittelbare Kontaktisolation. Mit einem definierten Hohlraum wird der Tragkörper vor die Dichthaut gesetzt. An diesem zylindrischen Tragkörper, auch Casing genannt, ist eine Metallfolienisolierung befestigt. Im Betrieb werden die Hohlräume in der Metallfolienisolierung und der zwischen dem zylindrischen Tragkörper und der Dichthaut mit Stickstoffgas gefüllt. Dieses Linerkonzept ist für Druckwasserreaktoren (DWR) gedacht und erhält zur Trennung von Wasser und Gas ein Wasserschloß im Bodenbereich. Vorteilhaft ist die geringe Temperaturbelastung der Dichthaut, besonders nachteilig stellen sich die unzureichende Betriebssicherheit der Isolierung am Tragkörper und im Bodenbereich und die fehlende Inspizierbarkeit des Bodens heraus /28/.

3.2.3.2.2 Wärmeschutzsystem mit warmem Liner

Die Überlegungen beim warmen Liner-Wärmeschutzsystem gehen dahin, den Linerwerkstoff nicht mit so hohen Temperaturen zu belasten, wie es beim heißen Liner-Wärmeschutzsystem mit 300°C der Fall ist. Dazu leitet man im SBB HHT /31,62,63/ Helium von 100 bis 150°C zwischen thermischen Schild und Liner und erzeugt einen Kühleffekt, der am Liner eine Temperatur von 100 bis 150°C bewirkt (Bild 3.14.3) /31/.

3.2.3.2.3 Wärmeschutzsysteme mit heißen Linern

Im Gegensatz zum kalten Liner erhält der heiße keine temperaturschützende Isolierung, so daß er der vollen Kühlmediumtemperatur ausgesetzt ist. Als Linerwerkstoff kommen austenitische und ferritisch/martensitische Stähle zum Einsatz. Dieses heiße Linerprinzip wird an Hand von vier Konzepten erläutert /28,29,30,93/.

Linerkonzept der Friedrich Krupp GmbH, Essen (Bild 3.14.4): Auf der Außenseite des heißen Liners, der aus einem austenitischen Werkstoff besteht, sind Ankerbolzen aufgeschweißt. Diese sind durch eine druckfeste Isolierschicht, einer Schüttung aus Keramikugeln und einer kalten Stützhaut geführt und verankern die Dichthaut im Beton. Dabei wird der heiße Liner bei HTR-(Hochtemperaturreaktor)Anwendung mit einer Temperatur von 260 bis 300°C beaufschlagt. Die Nachteile dieses Konzeptes liegen in der unzulänglichen Betriebssicherheit der heißen Dichthaut, bedingt durch die Hochtemperaturversprödung, durch die Spannungsrißkorrosion und durch die plastische Verformung des Linerwerkstoffes beim An- und Abfahren des Reaktors. Vorteilhaft ist die Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion und gute Schweißfähigkeit.

Linerkonzept der Kraftwerk-Union, Erlangen (Bild 3.14.5): Dieses Konzept baut auf dem Stützkesselprinzip auf, das die Zwängsspannungen in der Dichthaut dadurch vermeidet, indem der Stützkessel nicht fest mit der Betonhülle verbunden ist, sondern ein genau definierter Spalt dazwischen belassen wird. Im Betriebszustand stützt sich die Dichthaut über Pendelstützen und einer Mörtelschicht auf der Betonhülle ab, wobei das Kühlsystem in die Mörtelschicht verlegt wurde. Von Vorteil sind die geringe Linerbeanspruchung durch die kontrollierte Zwängung sowie ein zeitlich paralleler, örtlich getrennter Aufbau von Liner und Betonstützkörper, von Nachteil die Betriebsunsicherheit der Pendelstützen und der relativ geringe Entwicklungsstand.

Linerkonzept der Reaktorbau Forschungs- und Baugesellschaft Seibersdorf, Österreich (Bild 3.14.6): Der Grundgedanke dieses Konzeptes ist es, die Dichthaut nur elastisch zu verformen. Eine Begrenzung der Zwängsspannungen durch behinderte Wärmedehnungen in der Dichthaut ist notwendig und wird durch eine verringerte Temperaturdifferenz zwischen Stützbeton und Dichthaut erreicht. Während des Leistungsbetriebes wird dazu die Betontemperatur auf 120°C gehalten. Der heiße Liner wird durch Kopfdübelbolzen im Isolierbeton verankert, in dem sich auch ein Leckageentdeckungs- und Absaugesystem befindet. Der Isolierbeton wird von einer kalten Dichthaut begrenzt, auf dessen

Außenseite ein Kühlsystem aufgeschweißt ist. Zur Montageerleichterung und zum Zwecke der Stabilisierung wird zwischen dem Stützbeton und der kalten Dichthaut eine Mörtelfuge vorgesehen. Die hohe Betriebssicherheit stellt den großen Vorteil dieses Konzeptes, das schlechte Korrosionsverhalten der kühlmittelbeaufschlagten Komponenten und die Fraglichkeit der Genehmigungsfähigkeit der hohen Betontemperaturen von 120°C die Nachteile dar.

Linerkonzept des Battelle Institutes Frankfurt (Bild 3.14.7): Die aus einer Titanlegierung bestehende Dichthaut trägt auf der Rückseite Stegbleche, die auch untereinander verbunden sind und Gurtbänder tragen. Der Betonkörper selbst trägt Stirnscheiben und die zwischen dem Liner und dem Stützbeton verbleibende Mörtelfuge wird mit Isolierbeton verpreßt. Die großen Vorteile sind der korrosionsbeständige Dichthautwerkstoff aus Titan, keine großflächige Plastifizierung dieser infolge des Titans, die ausgesteifte Linerkonstruktion und die entkoppelte Linerverankerung. Nachteilig scheinen die hohen Kosten und das Problem des Schweißens der Titanlegierung zu sein.

3.2.3.3 Verankerungsmöglichkeiten

Prinzipiell kommen festverankerte, halbschwimmende und schwimmende Liner zur Ausführung /25/.

Beim festverankerten Liner sind alle Verankerungen starr mit dem Druckkörper verbunden, wie es beim SBB THTR Uentrop der Fall ist. Nachteilig ist aufgrund der auftretenden Lastfälle die hohe Druckspannung im Liner einerseits und die direkte Kraftübertragung vom Core über den Liner auf den Druckkörper andererseits. Vorteilhaft allerdings ist die Unterbindung der Kraftübertragung vom Entstehungsort zu den spannungsempfindlichen Durchbrüchen.

Der schwimmende Liner wird auf Grund seines Untermaßes gegenüber dem Innendurchmesser des Betonstützkörpers wesentlich geringer beansprucht als ein festverankerter, da er sich frei verformen kann. Die Anwendung ist allerdings nur auf Behälter mit wenigen Durchbrüchen beschränkt und könnte damit beim SBB THTR Uentrop nicht zur Anwendung kommen.

Einen Kompromiß zwischen festverankertem und schwimmendem Liner stellt der halbschwimmende Liner dar, der in der Nähe der Druckbehälterdurchbrüche fest und in den restlichen Bereichen schwimmend verankert ist. Die Kräfte konzentrieren sich bei diesem System weitgehend an den Durchbrüchen.

3.2.3.4 Linerintegrität

Unter Linerintegrität soll das Verhältnis von linerabdeckender Innenfläche zur gesamten Behälterinnenfläche verstanden werden. Kennt man bei RDB aus Spannguß /25/ die Möglichkeit des Streifenliners, bei dem davon ausgegangen wird, daß der Graugußwerkstoff selbst genügend dicht ist und die Fugen der einzelnen Gußblöcke durch eingegossene und abschließend verschweißte Blechstreifen abgedichtet werden, so trifft diese Annahme beim Werkstoff Beton nicht zu. SBB erhalten deswegen nur integrale Liner, bei denen die Linerintegrität laut obenstehender Definition gleich eins gesetzt wird.

3.2.3.5 Linervorfertigung

In der industriellen Produktion ist man bestrebt, einen sehr großen Vorfertigungsgrad der Produkte zu erreichen. Dabei ist der Vorfertigungsgrad V wie folgt definiert /32/:

$$V = \frac{\text{in der Fabrik geleistete Arbeit am Element}}{\text{auf der Baustelle noch erforderliche Arbeit am Element}}$$

Da der Vorfertigungsgrad lediglich das Ausmaß der Industrialisierung im Vergleich zur konventionellen Herstellung bestimmt, hat man mit dem Ausbaugrad A eine Maßzahl eingeführt, die auch in kostenmäßiger Hinsicht Rückschlüsse zuläßt. Kübler /33/ versteht unter dem Ausbaugrad A

$$A = \frac{\text{Wert eines leeren Elementes}}{\text{Wert eines ausgebauten Elementes}}$$

Im Zusammenhang mit dem Vorfertigungsgrad spricht man von Teilvorfertigung, weitergehender Vorfertigung und totaler Vorfertigung, wobei bei der Teilvorfertigung ein kleiner und bei der totalen Vorfertigung ein großer Vorfertigungs- und Ausbaugrad vorliegt.

Wie nun der Liner bei den verschiedenen Vorfertigungsgraden aussehen könnte, ist in Bild 3.15 dargestellt.

Bei der Teilvorfertigung werden die einzelnen Linersegmente des Deckels, des Bodens und des Zylinders im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle zum kompletten Linerkörper zusammengeschweißt. Dabei können die Zylindersegmente die Form von Panels, also vertikalen Linersegmenten wie in Bild 3.15 gezeichnet ist, besitzen, oder die Form von Schüssen, das sind waagerechte Linersegmente, annehmen. Der Vorfertigungsgrad ist klein, und es fällt noch relativ viel Ar-

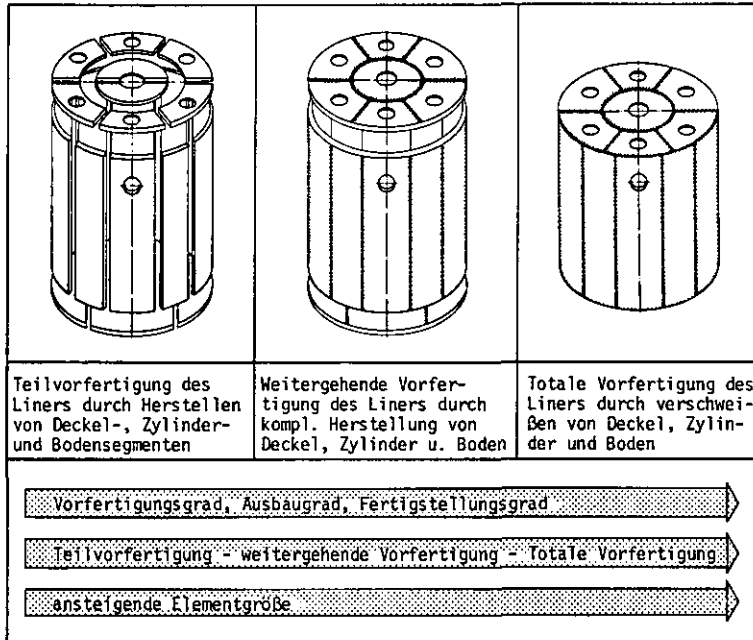


Bild 3.15:

Linerherstellung mit verschiedenen Vorfertigungs- und Ausbaugraden

beit auf der Baustelle an. Etwa diesen Vorfertigungsgrad besitzt der Liner des THTR Uentrop und der des Bugey 1. Einen wesentlich größeren Vorfertigungsgrad erzielte man bei SBB Hartlepool, wo der Linerkörper bis auf den Deckel vorgefertigt und nach dem Vorbetonieren des Behälterbodens der komplette Linerkörper versetzt wurde /34/. Damit erzielte man einen Vorfertigungsgrad, der zwischen dem der weitergehenden und dem der totalen Vorfertigung lag.

3.2.4 Wärmeisolationen

3.2.4.1 Notwendigkeit der Isolierung

Die Eigenschaften des Baustoffes Beton lassen nur begrenzte Temperaturen zu. Weiter temperatureinschränkend wirken Wärmespannungen, so daß für SBB Wärmeisolationen erforderlich werden, die in den Betonwänden den Temperaturgradienten auf 25°C beschränken und an den Kontaktflächen mit den Dicht- bzw. Kühllinern im Beton eine Temperatur von 50 bis 60°C bewirken. Diese thermischen Bedingungen werden von einem Wärmeschutzsystem erfüllt, das hauptsächlich aus der Isolierung und dem Kühlsystem besteht.

Anders kann das schon bei RDB aus Spanngrauguß oder aus Spannstahlguß sein, bei denen heute bereits Konzeptionen vorliegen, diese als sogenannte "warmgehende Behälter" /27,35/ ohne Wärmeschutzsystem zu versehen. Doch sind diese hier nicht Gegenstand der Betrachtung.

3.2.4.2 Anordnung der Wärmeisolation

Die Wärmeisolation kann auf der dem Core zugewandten Seite angeordnet werden, z.B. beim kalten Liner Wärmeschutzsystem, oder auf der dem Beton zugehörigen Seite wie beim heißen Liner Wärmeschutzsystem (Bild 3.16), woraus sich die spezifischen Anforderungen an die Wärmedämmung ergeben.

	Kaltes Liner-Wärmeschutzsystem						Heißes Liner-Wärmeschutzsystem		
Isoliermaterial	Metall	Metall + Gas	Beton	Keramik	Faser	Keramik + Faser	Metall	Beton	Keramik
Anordnung der Isolierung									
Ausführung der Isolierung	-Metall-folie -rauten-förmige Metall-zelle -Draht-gewebe	-Metall-folie + Stick-stoff-gas	-Bims-beton	-Kohle-stein	-Kaowool -Kerlane	-Keramik-Faser-matte	-Metall-folie -rauten-förmige Metall-zelle -Draht-gewebe	-Styropor-beton -Gasbeton -Naturbims-beton -Blähschieferbeton -Blähschieferbeton -Hüttenbims-beton -Aschesinterbeton	-kugel-förmige Hartpar-zelle
Isolier-konzeption	-THTR-Uentr. -Oldbury -Bugey 1 -Wylfa	-AB-Atom-energi	-EDF 3 -EDF 4 -St.Lau-rent II	-PR 500 -PR 3000 -PNP	-F.S.Vrain -Hinkl.Point -Hunterston -HTR 1160	HTR 1160		-KWU -RFB -Battelle	-Krupp

Bild 3.16: Isoliermaterialien für SBB mit kaltem und heißem Liner

Folgende Temperaturen auf der heißen Seite der Isolierung sind bei den unterschiedlichen SBB vorzufinden:

- Metallfolienisolierung: THTR Uentrop, Oldbury, Bugey 1, Wylfa ca 260°C
- Betonisolierung: EDF 3 und EDF 4 ca 410°C
- Faserisolierung: Fort St. Vrain, HTR 1160 bis 750°C

Die Wärmeleitzahlen sind neben der Druck- und Kühlmediumabhängigkeit auch temperaturabhängig und zeigen für die unterschiedlichen Isoliermaterialien die in Bild 3.17 dargestellten Kurvenverläufe /36,37,38,91/.

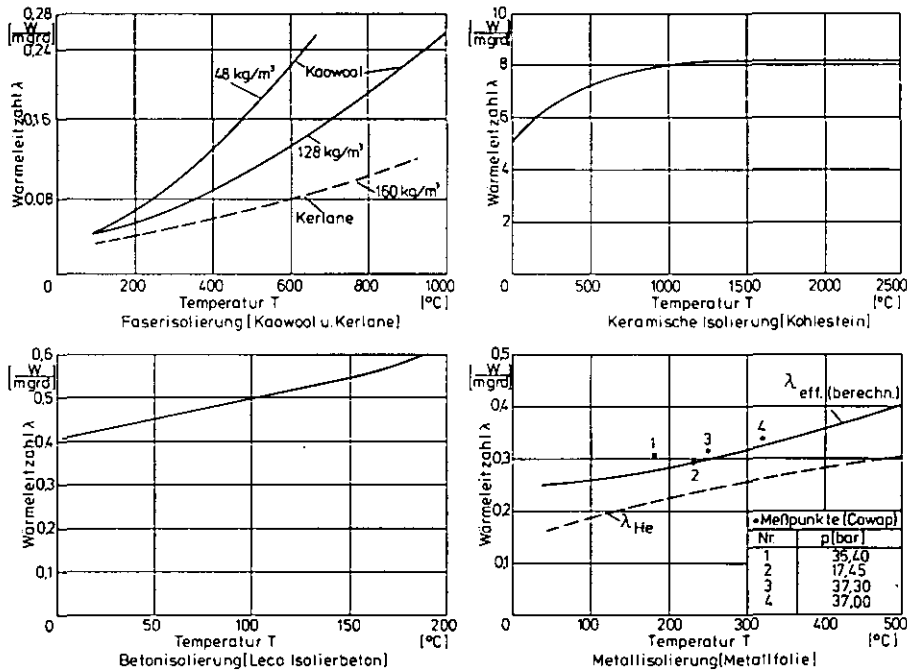


Bild 3.17: Wärmeleitzahlen verschiedener Isoliermaterialien in Abhängigkeit von der Temperatur

3.2.4.3 Isoliermaterialien für Wärmeschutzsysteme

Entsprechend der Temperaturbeaufschlagung der Isolierung und dem kontaktierenden Kühlmittel im SBB kennt man eine Vielfalt von Isoliermaterialien.

Kaltes Liner Wärmeschutzsystem: Für dieses sind folgende Isolierstoffe konzipiert bzw. zum Einsatz gebracht worden:

- Metallische Isolierungen: Die Wärmeübertragung innerhalb dieser Isolierung besteht aus Leitung über Metall und durch Gas sowie aus Strahlung und Konvektion. Um nun diese Wärmeübertragung durch Ausschaltung des Konvektionsanteiles so klein wie möglich zu halten, wurden mehrere Typen metallischer Isolierungen entwickelt:
 - Bei der Metallfolienisolierung werden abwechselnd Drahtnetz und Stahlfolien aufeinandergepackt und über Schrauben verspannt (Konzeption THTR Uentrop, Oldbury und Wylfa) /94/.
 - Aufeinandergeschichtete Feindrahtgewebe aus Fliegendraht sind der Hauptbestandteil der Drahtgewebeisolierung, wie sie beim Reaktor Bugey 1 verwendet wurde. Die Vorteile liegen in der einfachen Montage und der guten Festigkeit gegenüber Stoßbelastungen /5/.
 - Eine weitere Unterteilung des Gasraumes in der Isolierung kann durch si-

nusförmig gebogene Bleche erfolgen, wie es bei der Isolierung mit Drahtzellen der Fall ist.

Die Anordnung einer Metallfolienisolierung beim SBB THTR Uentrop zeigt Bild 3.18.1

- Isolierungen mit Metall und Gas: Die Dichthaut bekommt in diesem Fall keine unmittelbare Kontaktisolation. Die Kontaktisolation sitzt auf einem Tragkörper und zwischen dem Tragkörper und der Dichthaut befindet sich Stickstoffgas (schwedisches Konzept der AB Atomenergi, Studsvik).
- Betonisolierungen: Isolierungen aus Bimsbeton (er besteht aus Bimsstein und Portlandzement) sind bei den französischen Reaktoren EDF 3, EDF 4 und St. Laurent II eingesetzt. Wegen der Staubbildung und des hohen Wassergehaltes im Bimsbeton ist eine zweite Dichthaut notwendig und der SBB baut dadurch etwas größer.
- Keramische Isolierungen: Die keramischen Isolierungen basieren auf Kohlestein, Al_2O_3 - oder SiO_2 -Basis. Die Kohlesteinisolierung ist bei den HTR PR 500 und PR 3000 geplant und ersetzt dort einen Teil des sehr teuren Reflektors. Da sie sehr dick ist (1 m Wandstärke), vergrößert sie die SBB-abmessungen.
- Faserisolierungen: Die Faserisolierungen Koawool und Kerlane bestehen hauptsächlich aus Al_2O_3 und SiO_2 und erhalten Spuren an Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , CaO , Na_2O und B_2O_3 /5,91/.
Durch entsprechende Temperatur- und Strömungseinwirkung können die Fasern zerbrechen und Staubbildung ist die Folge, der Primärkreis verschmutzt und die Isolierwirkung wird abgebaut. (Konzeptionen Fort St. Vrain, Hinkley Point und Hunterston).

Eine Ausführungsvariante einer Faserisolierung ist im Bild 3.18.2 gezeigt.

- Keramik- und Faserisolierungen: Sie bilden sich aus einer Kombination der hauptsächlich verwendeten keramischen Kohlesteinisolierung und der auf SiO_2 und Al_2O_3 basierenden Faserisolierung. Vorzufinden beim HTR 1160, wo die thermische Isolierung aus Al-Si-Fasermatten und SiO_2 -Blöcken besteht (Bilder 3.18.3 und 3.18.4) /41/.

Dabei sind entsprechend der thermischen und mechanischen Belastung drei im Aufbau und Material unterschiedliche, keramische Isolierungen verwendet wor-

den, entsprechend den Isolierklassen A, B und C. Bild 3.18.3 zeigt den Aufbau des Wärmeschutzsystems für den Kaltgassammelraum oberhalb des Cores oder für die Dampferzeuger-(DE) Kavernen mit der bis 340°C zu beaufschlagenden Isolierung der Isolierklasse A, bestehend aus Al-Si-Fasermatten und Bild 3.18.4 zeigt das Wärmeschutzsystem des Heißgassammelraumes unterhalb des Cores, wobei hier eine Dreilagenisolierung der Isolierklasse C verwirklicht wurde, deren oberste vom Heißgas beaufschlagte Seite aus 76mm dicken SiO_2 -Blöcken besteht, die darunterliegende Schicht aus Si-Fasermatten und die unterste aus Al-Si-Fasermatten. Diese Isolierung ist für Temperaturen bis 780°C geeignet.

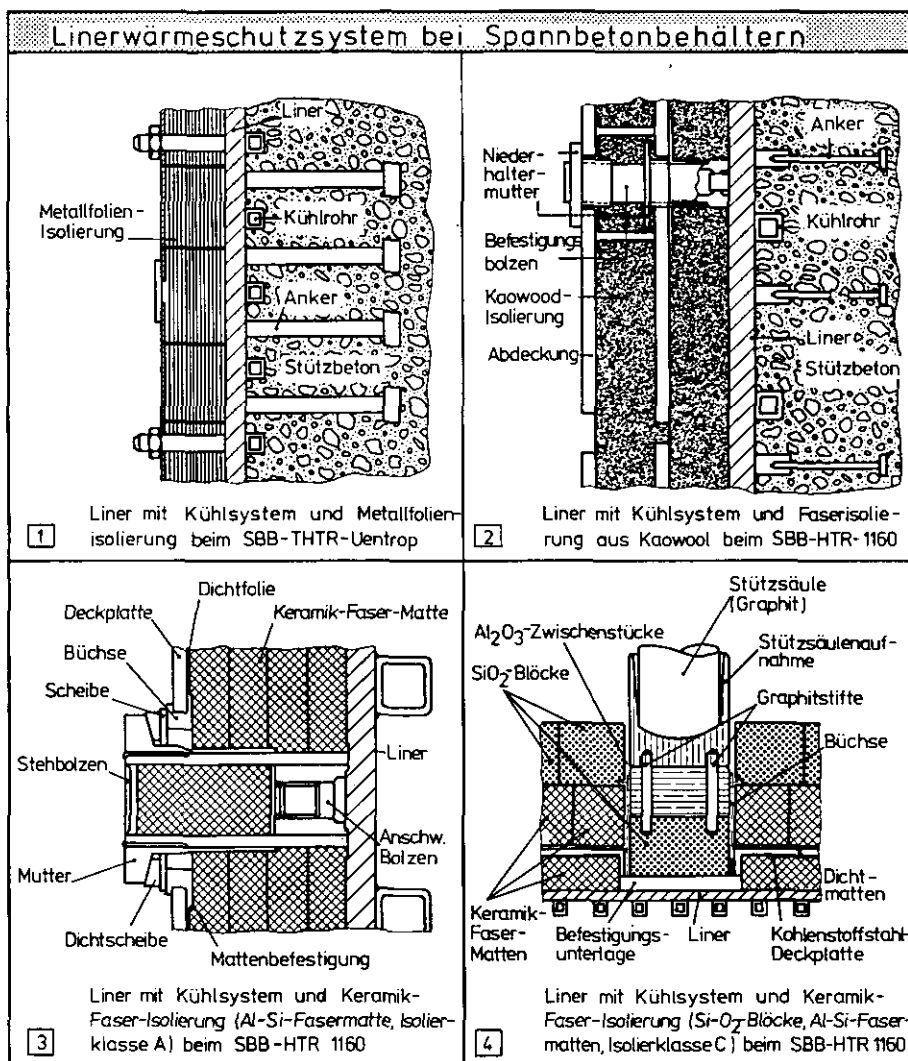


Bild 3.18: Liner Wärmeschutzsysteme mit verschiedenen Isoliermaterialien

Heißes Liner Wärmeschutzsystem: Dafür sind folgende Isolierstoffe denkbar:

- Metallische Isolierungen: Sie werden nur selten für diese Linerkonzepte verwendet, dafür umso mehr die Betonisolierungen.

- Wärmebetonisolierungen: Bei den Wärmeschutzsystemen der KWU-Erlangen /28/ und der RFB-Seibersdorf /28,30/ werden allesamt Isolierbetone in Form der in Bild 3.16 angegebenen Leichtbetone verwendet. Der Isolierbeton steht nicht in unmittelbarem Kontakt mit dem Primärgas, sondern wird durch den heißen Liner von diesem getrennt.
- Keramikisolierungen: Diese letzte Isolierungsmöglichkeit wird durch kugelförmige, keramische Hartparzellen erreicht, die nach der Einschüttung in die Isolationskammern abgebunden werden. Sie entwickeln neben der guten Isolierwirkung eine sehr hohe Druckfestigkeit (einachs. 12 N/mm²) und sind im Krupp-Wärmeschutzsystem mit heißem Liner /39/ zu finden.

3.2.5 Kühlsysteme

Der zweite wichtige Teil eines Wärmeschutzsystems für SBB wird durch das Kühlsystem gebildet, das zusammen mit der Isolation in der Behälterwandung eine Temperaturbegrenzung bewirkt.

3.2.5.1 Anbindung des Kühlsystems

Zwei Anbindungsmöglichkeiten des Kühlsystems im Verbund Wärmeschutzsystem sind bei SBB vorzufinden (Bild 3.19):

- die Anbindung der Kühlrohre hinter der Dichthaut (der dem Stützbeton zugewandten Seite) und
- die Anbindung der Kühlrohre vor der Dichthaut (der dem Core zugewandten Seite).

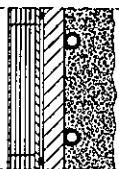
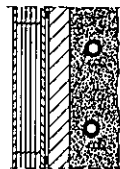
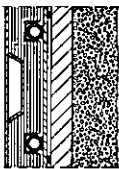
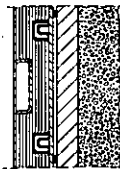
Anbindung des Kühlsystems	Linergebundenes Kühlsystem	Betonintegriertes Kühlsystem	Liner- und Beton-ungeb. Kühlsystem	Liner- und Beton-ungeb. Kühlsystem
Ausführung				
Lage des Kühlsystems	hinter dem Liner im Betonstützkörper	hinter dem Liner im Betonstützkörper	vor dem Liner in der Isolierschicht	vor dem Liner in der Isolierschicht
Kühlmedium	Wasser	Wasser	Wasser	Gas
Konzeption	THTR 300; Wylfa EDF 3,4; Oldbury	RFB KWU	FIGARO	FIGARO

Bild 3.19: Mögliche Kühlsystemanordnungen bei SBB

Die Anbindung der Kühlrohre hinter der Dichthaut bindet das Kühlsystem entweder an den Liner (Linergebundenes Kühlsystem) oder an den Beton (Betonintegriertes Kühlsystem).

Die Anbindung der Kühlrohre vor der Dichthaut kennt nur das Liner- und Betonungebundene System.

Die klassische Kühlrohranbindung ist die hinter dem Liner im Betonstützkörper (Bild 3.19.1), wobei die Kühlrohre auf die Linerrückseite geschweißt sind. Als Kühlmedium wird Wasser verwendet. Diese Ausführung ist bei sehr vielen SBB durch die vom Sicherheitsstandpunkt betrachtete, günstige Anordnung vorzufinden, hat aber die Nachteile der relativ hohen Wärmeverluste und der Aufwendigkeit der Fertigung und Montage.

Die Loslösung des Kühlsystems vom Liner und ihre Verlagerung in den Beton (Bild 3.19.2) wurde bei den Konzepten RFB und KWU vorgenommen, was bei SBB aus Fertigteilen eine getrennte Vorfertigung von Betonwandblöcken mit integriertem Kühlsystem und Linerkörper erlaubt.

Die Ausführungsmöglichkeiten FIGARO (Bilder 3.19.3 und 3.19.4) der Forschungsanlage für die Isolierung gasgekühlter Reaktoren in Oberhausen, die im Rahmen eines Forschungsauftrages der Firmen Indatom, Paris (jetzt SOCIA) und Deutsche Babcock & Wilcox AG, Oberhausen /40/ errichtet wurde, vermeidet diese Nachteile durch die Anordnung der Kühlrohre vor dem Liner in der Isolierschicht, wobei die Kühlrohre auf eine Grundplatte aufgeschweißt werden. Dabei ist das System mit Wasser dadurch gekennzeichnet, daß auf der Linerinnenseite vorgefertigte Bauteile montiert werden, die Isolierung und Kühlsystem gleichzeitig enthalten, so daß der Liner kein Kühlsystem mehr benötigt. Ferner ist die Zugänglichkeit zum Kühlsystem bei einer Reparatur günstig. Nachteilig bei Leckagen ist der Wasserzulauf in den Primärkreis bei gasgekühlten Reaktoren.

Diesen Nachteil unterbindet das System FIGARO mit Gaskühlung, wobei das gleiche Gas mit demselben Druck zur Kühlung verwendet wird, das sich im Primärkreis befindet. Die Sicherheit der Anlage erhöht sich, da keine wasserführenden Rohre eingebaut sind und damit Rohrbrüche, Korrosion und Verstopfungen unterbleiben.

3.2.5.2 Form der Kühlrohre

Die für SBB eingesetzten Kühlrohre können die Form von Vierkantrohre, U-förmige Rohre, runde Rohre und halbrunde Rohre aufweisen.

So sind im Behälter des THTR Uentrop am zylindrischen Linerteil Vierkantrohre aufgeschweißt und an den Linervouten runde Rohre. Die vierkantigen Rohre zeichnen sich gegenüber den runden durch bessere Handhabung beim Schweißen sowie der geringeren Gefahr des Locheinbrennens beim Liner aus, da man gegen das Kühlrohrmaterial schweißt.

Ferner sind U-förmige Rohre bei gasführenden Kühlrohren zum Einsatz gelangt (System FIGARO), die ebenso wie Kühlrohre halbkreisförmigen Querschnitts (System AB Atomenergi) gut schweißbar sind aber den Nachteil haben, daß das Kühlmedium den Linerwerkstoff bestreicht und durch den Kontakt Korrosionsschäden auftreten können.

3.2.5.3 Kühlsystemanordnung und -redundanz

Aus Sicherheitsgründen wird das Kühlsystem mehrfach redundant ausgelegt, beim THTR Uentrop /38/ und HTR 1160 /41/ zweifach, beim PR 500 /42/ dreifach redundant. Dabei werden die Oberflächen in der Weise gekühlt, daß die Kühlrohre von den Systemen abwechselnd nebeneinander gelegt werden. Bei Ausfall eines Systems ist die Kühlwirkung dabei noch ausreichend. Um eine Kompensation der Aufheizung in den Kühlrohren zu ermöglichen, läßt man die Systeme entgegengesetzt anströmen.

Entsprechend der Kühlrohranordnung wird häufig eine Aufteilung in die Bereiche zylindrischer Teil, Boden, Deckel und Durchführungen angestrebt, wie es beim SBB THTR Uentrop der Fall ist (Bild 3.20) /43/, da diese Bereiche unterschiedlich komplex sind.

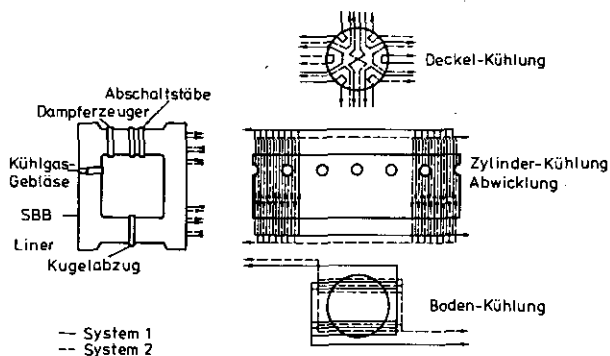


Bild 3.20:

Kühlsystemanordnung
beim SBB THTR Uentrop

3.2.5.4 Kühlrohrführung

Die Kühlrohre können im zylindrischen Bereich des SBB waagrecht, senkrecht und schräg geführt werden. Während man die schräge Führung kaum noch anwendet,

wird die senkrechte oder waagrechte in Abhängigkeit der Behältergeometrie gewählt. So hat das schwedische Wärmeschutzsystem AB Atomenergi Studsvik und das des Kernliners des HTR 1160 eine waagrechte Rohranordnung, die Linder der seitlichen Kavernen des HTR 1160 und des THTR Uentrop eine senkrechte (siehe auch Bild 3.20).

Bei der Schußbauweise des Linters besteht der Nachteil der senkrechten Rohranordnung darin, daß die Stoßstellen der Linerverrohrung für jeden einzelnen Linterschuß fluchten und auf der Baustelle zusätzlich verschweißt werden müssen. Außerdem müssen alle Kühlrohre bei waagerechter Rohranordnung entsprechend dem Linteraßenradius gebogen werden. Diesen beim Linterbau sehr kostenaufwendigen Nachteil umgeht die Panelbauweise mit vertikaler Verrohrung.

3.2.6 Behälterfundamente

Nachdem man sich Klarheit über die Bodenbeschaffenheit, die Beanspruchungen und die konstruktiven Randbedingungen für ein SBB-Fundament verschafft hat, kann die Auswahl nach Bild 3.21 erfolgen.

Gründungsform	Flachgründung	Pfahlgründung	Plattformgründung	Sondergründung
Bodenbeschaffenheit	Boden genügend tragfähig u. dick	Tragfähiger Baugrund in großen Tiefe	Kernkraftwerksstandort im Wasser	Bergschäden- und Erdbeben-Gebiet
Beanspruchung durch Umwelt	klein	mittel	hoch	sehr hoch
Ausführung	Einzelfund. Streifenfund. Plattenfund.	Fertigpfähle Ortpfähle	Plattenfund.	F. mit Vollsich. F. mit Teilsich. Einzelfund.
Fundamentform	Vollfund. Ringfund. Sternfund.		viereckige Plattform	Vollfund. Ringfund.
Konzeption	THTR 300 HTR 1160		Atlantik 1u.2 Rostov	Teheran 1 u. 2

Bild 3.21: Möglichkeiten zur Fundamentgestaltung für SBB

Ist der Boden unter dem Fundament genügend tragfähig, stellt eine Flachgründung eine technisch und wirtschaftlich gute Lösung dar /44/. Ausgeführt kann sie als Einzel-, Streifen- und Plattenfundament werden.

Das Einzelfundament soll überwiegend senkrechte Lasten aufnehmen und ist außerdem nur für eine Kraftwerkskomponente geeignet.

Liegen Einzelfundamente gleicher Belastung und Größe nahe beieinander, wie es bei den Doppelblockanlagen in Hartlepool und Heysham in GB der Fall ist, so können die Einzelfundamente zu einem Streifenfundament verbunden werden.

Wird das Einzelfundament in beiden Dimensionen vergrößert, bekommt man ein Plattenfundament, das bei Auftreten einer Vielzahl von Lasten auf kleinem Raum erbaut wird.

So findet man Einzel-, Streifen- und Plattenfundamente in Form eines Ringes beim THTR Uentrop und PR 500 und in Form eines Sternes beim HTR 1160 und HHT 1080.

Liegt der tragfähige Boden in großer Tiefe und würde damit verbunden die Errichtung einer Flachgründung zu großen Bauaufwand bedeuten, wird man eine Pfahlgründung einrichten.

Hat man sich entschieden, ein KKW in das Meer zu bauen, z.B. aus Mangel an Landstandorten, wie es bei den amerikanischen KKW Atlanta 1 und 2 /45/ und dem russischen KKW Rostov /46/ der Fall ist, so liegt hier eine Art Plattformfundament vor in Form einer schwimmenden Plattform. Auf dieser Plattform befindet sich die gesamte KKW-Anlage und wird vor der Küste schwimmend verankert.

KKW, die auf bergschäden- und erdbebenbehaftetem Boden stehen, müssen so gebaut werden, daß sie die Erdbewegungen ohne Schaden der Anlagen aufnehmen können, wozu Sonderfundamente notwendig werden. Je nach der Sicherungsstufe gegen diese bodenverformenden Einwirkungen wird das Fundament konstruktiv unterschiedlich aufgebaut. Die deutsche KWU ist z.Zt. mit dem Bau von zwei KKW in iranischen, erdbebengefährdeten Gebieten beschäftigt, wobei sie sich mit solchen Gründungs- und Fundamentfragen zu befassen hat.

3.2.7 Behälterdurchführungen

Die Durchführungen des SBB erhalten als Fortsetzung des Liners eine gasdichte Auskleidung, die oft auch als Rohrliner oder Panzerrohre bezeichnet werden. Die Funktion dieser Auskleidung ändert sich beim Heraustreten aus der Betonwand. Dementsprechend wird eine aufgabenspezifische Unterscheidung zwischen der Behälterdurchführung, die ca. 1m vor der Außenkante der Betonwand endet und dem Behälterabschluß vorgenommen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Durchführungen von SBB, das nachfolgende mit den SBB-Abschlüssen.

3.2.7.1 Notwendigkeit der Durchführungen (Panzerrohre)

Die Aufgaben der Durchführungen liegen primär in der Kühlmittelabdichtung und sekundär in der Reduktion der Spannungsspitzen im angrenzenden Beton, in der Erhöhung der Steifigkeit der Betonstruktur und in der Aufnahme eines Kühl- und Verankerungssystems auf der Außenseite sowie einer Isolierung auf der Innenseite.

3.2.7.2 Temperaturbeaufschlagung

Rohrliner können hoch- und niedertemperaturbeaufschlagt sein, je nachdem sie z. B. mit Heißgas von 260°C bei einer Koaxialleitung eines HTR in Berührung kommen oder Auskleidungen für Instrumentierungen sind und sich eine Temperatur von ca 50°C einstellt.

3.2.7.3 Durchführungsarten

An Hand des SBB THTR Uentrop sind in Bild 3.22 /38/ die Durchführungen nach Durchmesser, Anzahl Temperaturbeaufschlagung und eingesetztem Werkstoff aufgelistet.

Nr.	Durchführung	lichter Durchm. (mm)	Anzahl (Stück)	max. Wandtemp. + (Temp. am Abschlußdeckel) °C	vorgesehener Werkstoff f.d. Panzerrohre
1	Dampferzeuger	2250	6	50 (350)	FB 40 AK (Mannesmann)
2	Gebläse	2150/1600	6	50 (60)	FB 40 AK
3	Kugelabzugsrohr	1300	1	50	FB 40 AK
4	Mannloch und Ersatzdurchführung	800	2	50 (60)	FB 40 AK
5	Förderrohre Beschickungsanlage	520	10	50 (250)	FB 40 AK
6	Abschaltstäbe u. Instrumentierung	400	55	50 (60)	FB 40 AK
7	Thermoelemente (ausbaubar)	300	12	50 (60)	FB 40 AK
8	Neutronenmeßkolonne	800	4	50 (60)	FB 40 AK
9	Neutronenflußverteilungsmessung	300	3	50	FB 40 AK
10	Kühlgas	300	6	50	FB 40 AK

Bild 3.22: Hauptdaten der Durchführungen des SBB THTR Uentrop

3.2.7.4 Durchführungskonstruktionen

Mit den Merkmalen Temperaturbeaufschlagung, Material, Form und Konstruktion ergibt sich die in Bild 3.23 gezeigte Systematik:

Merkmal	Ausführung	Konzeption
Temperaturbeaufschlagung	niedrig 50°C hoch 270°C	Einzelleitung PR 500 Koaxialleitung PR 500
Material	Stahl	FB 40 AK der Fa. Mannesmann
Form	runde Basisfläche	fast alle Ausführungen
Konstruktion	- Einzelleitung innen isoliert m. Direktverankerung - Doppelleitung innen isoliert o. Direktverankerung	

Bild 3.23:

Möglichkeiten der Durchführungen für SBB

Im Nachfolgenden soll kurz auf einige Ausführungsvarianten von Durchführungen für SBB eingegangen werden (Bild 3.24).

Im Bild 3.24.1 ist die Mannloch- und Ersatzdurchführung des THTR Uentrop SBB dargestellt, eine fest im Beton verankerte Einfachkonstruktion aus Stahl, an die sich innen und außen die angeschweißten Stahlflansche anschließen.

Bild 3.24.2 stellt die Koaxialleitung des SBB PR 500 dar. Sie besteht aus dem 1 m weiten 500°C beaufschlagten Heißgasrohr und dem 250-gradigen Kaltgasrohr, das das Heißgasrohr zentrisch umgibt. Es besteht aus Kesselbaustahl der Güte 13CrMo44. Thermische Dehnungen werden durch eingebaute Kompensatoren und Gaskräfte durch Zuganker aufgenommen /42/.

Die Fa. Krupp, Essen, schlägt bei einem Referenzbehälter (Bild 3.24.3) /47/ ein Doppelpanzerrohr vor, dessen Vorteil in der Zwängsspannungsfreiheit liegt. Das innere Rohr übernimmt dabei die Druckaufnahme, das äußere leitet nur noch die vom Kühlspace zum Beton fließende Wärme zu den Kühlrohren ab.

Einen weiteren Schritt in dieser Richtung unternimmt die Fa. Krupp in Bild 3.24.4 /47/, bei dem das kalte Panzerrohr ganz weggelassen wird, um eine sogenannte "stahlbetonbaugerechte Randverstärkung des Betons durch eine Spiralbewehrung" zu erhalten.

Bild 3.24.5 zeigt Alternativlösungen, die eine freie Relativbewegung zwischen dem Beton und dem Stahlpanzerrohr ermöglichen. Die erste Möglichkeit verankert das Rohr nur am Liner, gewährleistet damit die Längsausdehnung und läßt für

die radiale Wärmeausdehnung bei einem selbständig druckaufnehmenden Rohr einen Freiraum. Kann dieser Freiraum nicht gegeben werden, werden Gleitflächen vorgesehen, was die zweite Möglichkeit darstellt. Eine dritte ist der Einbau von Kompensatoren /48/.

Beim KWU-Referenz-SBB für einen Siedewasserreaktor /30,49/ (Bild 3.24.6) werden die Primärrohrleitungen als zweigeteilte Rohre ausgebildet, wobei die Axialkräfte über einen geteilten Konus momentfrei in das Mauerwerk eingeleitet werden. Die Dichtung gestaltet sich durch einen Torus, der die radialen und axialen Dehnungen der Rohrleitungen kompensiert.

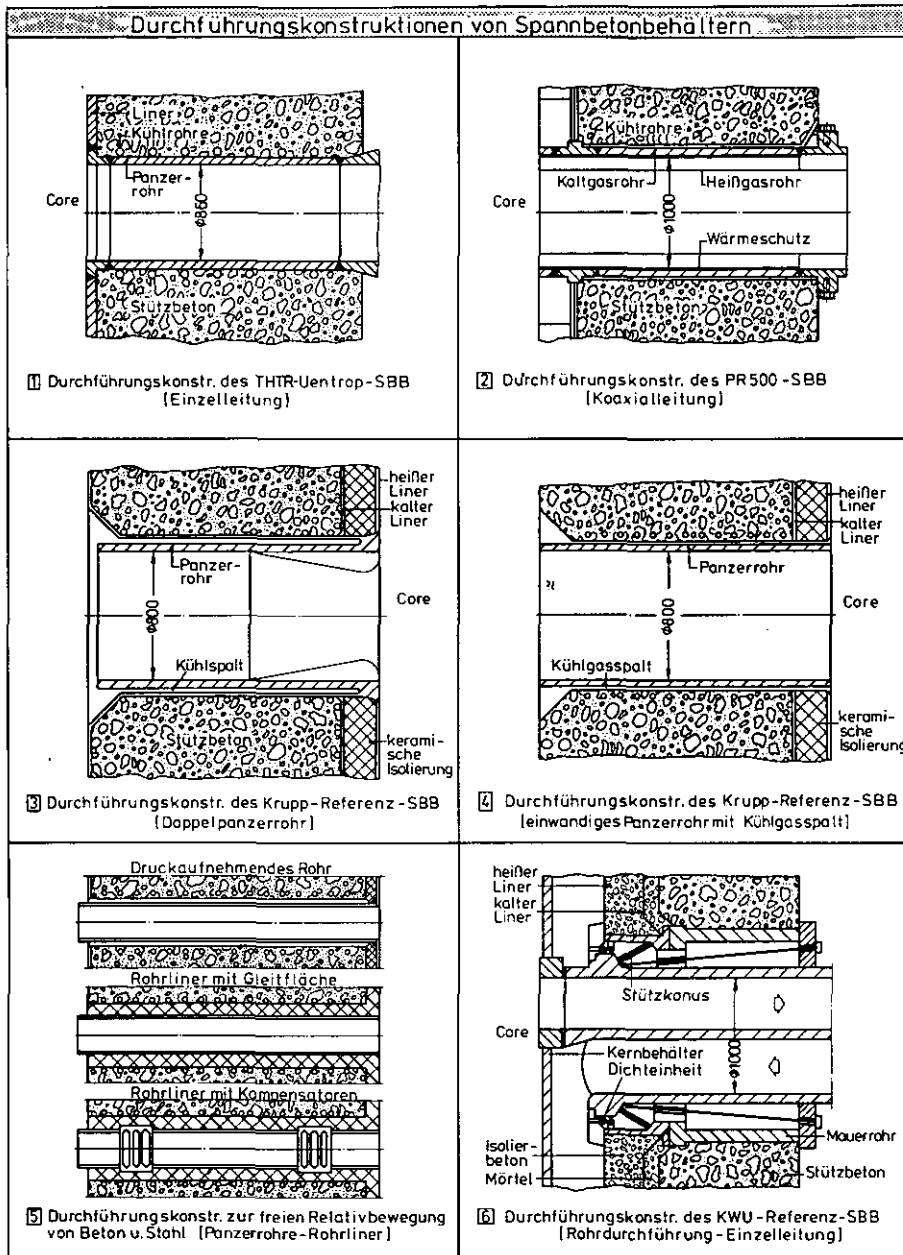


Bild 3.24: Durchführungskonstruktionen für SBB

3.2.8 Behälterabschlüsse

3.2.8.1 Notwendigkeit der Behälterabschlüsse

Die primären Aufgaben der Behälterabschlüsse liegen in einer entsprechenden Druckfestigkeit gegenüber dem meist anstehenden Primärkreisdruck und einer Gasdichtheit.

3.2.8.2 Verwendung der Behälterabschlüsse

Behälterabschlüsse für SBB werden allgemein für folgende Durchführungen benötigt: Zentrale Coreöffnung, Stollen für Dampferzeuger, Nachwärmeabfuhrsysteme, Röhrenspaltöfen, Gebläse, Mannloch, Abschaltrohre, Kugelabzugsrohr und Rohre für die Neutroneninstrumentierung. Es sei jedoch vermerkt, daß ein Teil dieser Durchführungen meistens in einer Kombination bei SBB auftreten, was sich nach dessen Verwendung richtet.

3.2.8.3 Materialien für Behälterabschlüsse

Die in Frage kommenden Werkstoffe sind Stahl und Beton, wobei bei SBB für HTR die Deckel vorwiegend aus Beton z. B. Bn 450 und für LWR wegen der kleineren Abmessungen aus Stahl z. B. 22NiMoCr37 gebaut werden.

3.2.8.4 Temperaturbeaufschlagung

Wegen der spezifischen Eigenschaften des Betons ist bei Betondeckeln eine "kalte Ausführung" erforderlich, bei der innen eine Isolierung und außen ein Kühlsystem aufgebracht wird. Ein Stahldeckel kann sowohl "heiß" als auch "kalt" ausgelegt werden. Die Auswahl hängt vom speziellen Einsatz ab.

3.2.8.5 Formen von Behälterabschlüssen

Die Behälterabschlüsse (Deckel) (Bild 3.25) nehmen vorwiegend die Form von runden Deckeln ein. Dabei können sie bei Betonausführung monolithisch erstellt (z.B. die skandinavische Version /50/ mit kalottenförmiger Innenseite und gerader Außenkontur sowie beim SBB PNP 600 /51/ mit geraden Abschlüssen) oder aus Fertigteilen (z.B. der Deckel des Siemensbehälters /12/ mit keilförmiger Geometrie) zusammengesetzt werden.

Bei Stahlausführung findet man ebenso runde Deckel mit kalottenförmiger Innen- und gerader Außenseite, wie es bei den Deckeln des KWU/RFB/VA-Behälter /30/

der Fall ist, wie auch konkav nach innen gekrümmte beim RFB-Modellbehälter /29/. Fast gerade auslaufend kann die Form der Behälterdeckel des SBB THTR Uentrop /38/ angesehen werden.





















Merkmal	Stahldeckel			Betondeckel		
	Ausführung	Abbild.	Konzeption	Ausführung	Abbild.	Konzeption
Konstruktion	-Einfachdeckel		RFB KWU	-Einfachdeckel		ABAS
	-Doppeldeckel		THTR 300	-Doppeldeckel		PNP600 PNP3000
Material	-Stahl		THTR 300 HTR 1160	-Stahlbeton		ABAS
				-Spannbeton		PNP600
Form	-runde Basisfläche		THTR 300 HTR 1160	-runde Basisfläche		ABAS PHP
	-gerade Abschlüsse		THTR 300 HTR 1160	-gerade Abschlüsse		ABAS PHP
	-gekrümmte Abschlüsse		RFB KWU	-gekrümmte Abschlüsse		Krupp
	-zylindr. Mantel		THTR 300 RFB	-zylindr. Mantel		ABAS Krupp
				-keilförm. Mantel		Siemens
Bauweise	-Vollmaterial		KWU	-Monolith		ABAS Krupp
	-Mehrlagenschicht		Krupp	-Fertigteil		Siemens PNP600

Bild 3.25:

Möglichkeiten der Behälterabschlüsse für SBB

3.2.8.6 Konstruktionen von Behälterabschlüssen

Auf Grund der vorangehenden Betrachtungen über die einzelnen Merkmale der Behälterabschlüsse läßt sich die in Bild 3.25 gezeigte Systematik erstellen, wobei anzumerken ist, daß die Merkmale bei den einzelnen Behälterabschlußkonstruktionen in Form von Stahl- und Betondeckeln in Kombination vorzufinden sind. Die konstruktive Ausbildung der Deckel für SBB richtet sich hauptsächlich nach dem Verwendungszweck (Bild 3.26).

Deckelkonstruktionen aus Stahl:

Für gas- und wassergekühlte Reaktoren hat die RFB-Seibersdorf /29/ zur Abdeckung der Corekaverne eines Modellbehälters einen abnehmbaren, kalottenförmigen Einfachstahldeckel vorgesehen, der sich über Pendelstützen auf einem Spannbetonring abstützt (Bild 3.26.1).

In ähnlicher Weise geschieht dies bei der Deckelkonstruktion Bild 3.26.2 des Referenzentwurfes der KWU /30/ für einen DWR nach dem Konzept der RFB in Zusammenarbeit mit Firmen und Institutionen. Der diesmal nach innen gewölbte

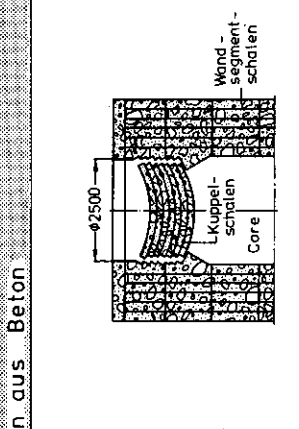
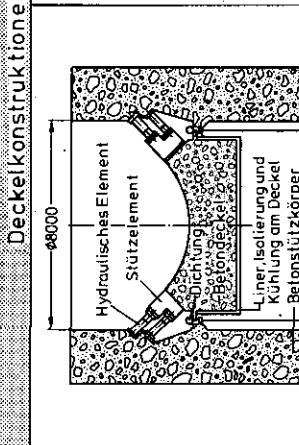
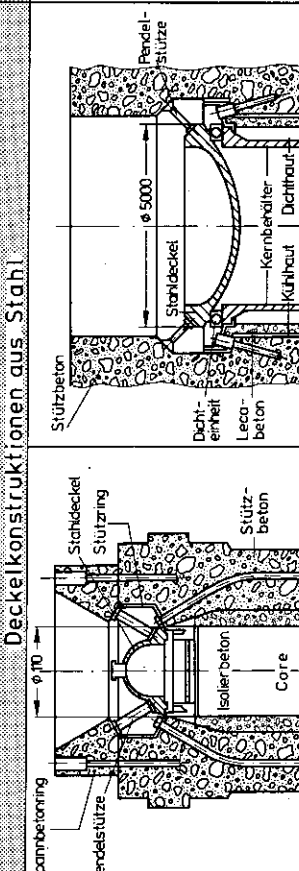
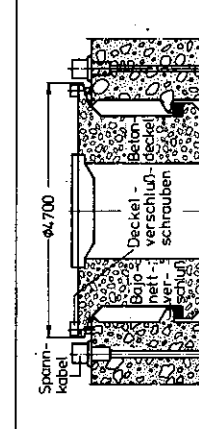
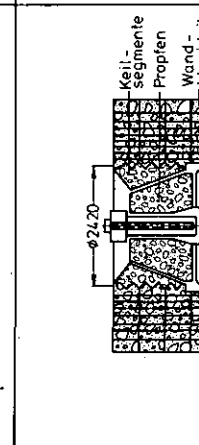
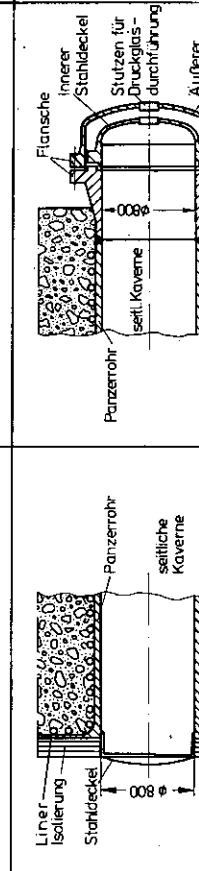
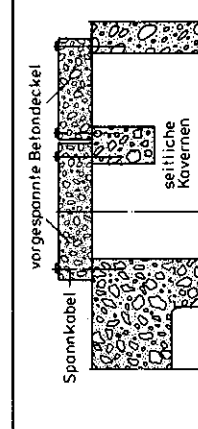
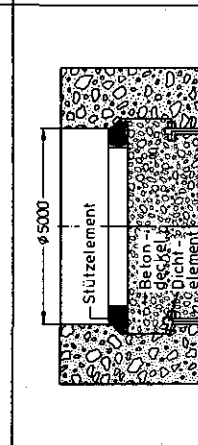
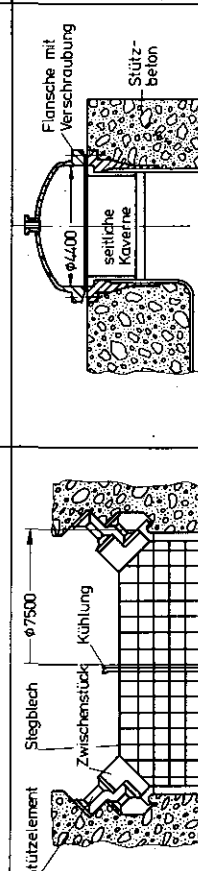
Deckelkonstruktionen aus Stahl	Deckelkonstruktionen aus Beton	
 <p>1 Deckelkonstruktion des RFB-Modell-SBB Für HTR u LWR; Konvex geringerer Kollateralschaden</p>	 <p>7 Deckelkonstruktion des KWA-Referenz-SBB Für DWR; Konvex geringer Kollateralschaden</p>	 <p>17 Deckelkonstruktion des THTR-Untertrop-SBB Für HTR; Stahleinfachdeckel</p>
 <p>2 Deckelkonstruktion des KWA-Referenz-SBB Für DWR; Konvex geringer Kollateralschaden</p>	 <p>7 Deckelkonstruktion des KWA-Referenz-SBB Für DWR; Konvex geringer Kollateralschaden</p>	 <p>17 Deckelkonstruktion des THTR-Untertrop-SBB Für HTR; Stahleinfachdeckel</p>
 <p>23 Deckelkonstruktion des THTR-Untertrop-SBB Für HTR; Stahleinfachdeckel</p>	 <p>27 Deckelkonstruktion des THTR-Untertrop-SBB Für HTR; Stahleinfachdeckel</p>	 <p>33 Deckelkonstruktion des THTR-Untertrop-SBB Für HTR; Stahleinfachdeckel</p>

Bild 3.26: Behälterabschlußkonstruktionen für SBB aus Stahl und aus Beton

Stahldeckel leitet über 24 Pendelstützen die Innendruckkräfte in den Spannbeton und wird über einen Mehrlagentorus abgedichtet.

In den Bildern 3.26.3 und 3.26.4 sind Deckelkonstruktionen zum Abschluß des Mannloches sowie der Ersatzdurchführung (ähnlich ist die Kühlgasgebläsedurchführung abgeschlossen) des SBB THTR Uentrop /38/ dargestellt, wobei der Außenabschluß durch Doppeldeckel in Form gewölbter Böden mit angeschweißten Flanschringen gebildet wird. Dabei werden diese Deckel mit Gegenflansche verschraubt, die am Anschlußrohr befestigt sind. Den Innenabschluß bildet ein Stahleinfachdeckel.

Um den Transport, die Fertigung und die Handhabung auf der Baustelle zu erleichtern, hat die Firma Krupp /52/ einen Stahldeckel für LWR-SBB konstruiert (Bild 3.26.5), dessen räumliche Tragstruktur aus senkrecht zueinander stehenden, verbundenen, sechseckförmigen Stahlrohren gebildet wird.

Für den Abschluß der DE-Kaverne eines am Institut für Reaktorentwicklung der Kernforschungsanlage Jülich in Zusammenarbeit mit der Fa. General Electric, USA /53/ entworfenen 3000 MW_{th} - Kernreaktors zur kombinierten Methanspaltung und Dampferzeugung ist in Bild 3.26.6 wiederum ein anschraubbarer Stahleinfachdeckel vorgesehen.

Deckelkonstruktionen aus Beton:

In Analogie des konkav ausgebildeten Stahldeckels bildet den Abschluß eines Referenz-SBB für LWR der Fa. Krupp /47/ (Bild 3.26.7) ein als konkave Kugelkalotte ausgebildeter, nicht vorgespannter Betondeckel, der durch Auflager abgestützt wird und stellt eine Alternativmöglichkeit zum Stahldeckel Bild 3.26.5 des gleichen SBB dar.

Versuche, den Betondeckel aus Betonfertigteilen zu bauen, sind in den Bildern 3.26.8 und 3.26.9 gezeichnet. So baute die Fa. Hochtief AG, Frankfurt /54/ (Bild 3.26.8) einen aus Betonkuppelschalen zusammengesetzten Fertigteildeckel, der nicht vorgespannt wird und dessen Fertigteile sich über stählerne Gelenklager gegen die Eckringe der Wand abstützen. Vorteilhaft ist dabei die momentfreie Deckellagerung.

Die Fa. Siemens (Bild 3.26.9) /12/ schließt ihren Modell-SBB durch einen aus Keilsegmenten bestehenden Keilring ab, auf dem sich mittig ein Propfen in der Form eines Pyramidenstumpfes abstützt. Die Keilsegmente greifen dabei wiederum in die Behälterwand ein.

Für die DE-Pods des schon erwähnten PNP 3000 SBB /53/ sind für die 4,4 m weiten Pods nichtvorgespannte Betondeckel vorgesehen (Bild 3.26.10), die mittels Bajonettverschlüsse am SBB verankert werden.

Bild 3.26.11 zeigt den Coreabschluß eines DWR-SBB eines Referenzentwurfes der Fa. Krupp /39/ unter Verwendung eines nichtvorgespannten, geradeauslaufenden Betondeckels.

Eine neue Entwicklung wird durch die vorgespannten Betondeckel für HTR-SBB in Bild 3.26.12 verkörpert, die zusammen mit dem Betonstützkörper vorgespannt werden und beim Referenzentwurf des PNP 600 und PNP 3000 vorzufinden sind.

3.2.9 Behälterinstrumentierungen

Um die Sicherheit und Funktionstüchtigkeit eines SBB nachzuweisen und Aufschlüsse über sein Verhalten, insbesondere über das Langzeitverhalten unter Betriebsbedingungen, zu erhalten, muß der SBB einer Instrumentierung unterzogen werden. Von den Instrumentierungssystemen Kerninstrumentierung, Behälterinstrumentierung und Primärkreisinstrumentierung, soll hier nur das auf den Behälter bezogene erläutert werden, das der nach einem Normentwurf für Reaktordruckbehälter aus Spannbeton /7/ vorgeschlagenen Betriebsinstrumentierung entspricht. Bild 3.27 zeigt die zu messenden physikalischen Größen.

Verformungsmessung: Nach Ailbach /55/ wird zur Dehnungsmessung im Beton unter dreiaxialer Beanspruchung ein Meßwertaufnehmer in den Beton eingesetzt, bei dem der Meßdraht mit verdichtetem Oxydpulver isoliert und in ein sehr dünnes Metallrohr eingebracht wird. An den Linern, Panzerrohren und Behälterabschlüssen dominieren die elektrischen Verfahren mit aufgeschweißten Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen und die Hochtemperatur-Wegaufnehmer nach dem Differentialtransformatorprinzip, bei dem die Stellung des Kernes und damit der Ausgangsspannung ein Maß für die Verformung darstellt.

Soll unter hoher Temperatur und intensiver Kernstrahlung längere Zeit gemessen werden (z.B. bei Wegmessungen an Regelstabdurchführungen oder bei einem heißen Liner), so können fluidische Meßverfahren die elektrischen ergänzen. Ein geeignetes Prinzip dafür ist das Kompensationsmeßverfahren, bei dem vier kritisch durchströmte Düsen nach einer Wheatstoneschen Brücke zusammengeschaltet werden und eine durch eine Verformung verursachte Nadelstellung auch eine veränderte Nadelstellung in einer zweiten Düse bewirkt. Zur Messung der Spannkabelvorspannkräfte erscheinen neben Dehnmeßstreifen und Kraftmeßdosen magnetoelastische Kraftaufnehmer gut geeignet, da sie sehr robust sind.

Zu messende physik. Größen	Meßort (-stelle)	Meßverfahren	Bildliche Darstellung
1. Verformung	- Beton	- Beton Dehnungsaufnehmer von Ailtech	
	- Liner - Panzerrohre - Kühlsystem	Elektrische Meßverfahren - aufschweißbare Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen - Hochtemp.-Wegaufnehmer nach dem Differentialtransformatorprinzip Fluidische Meßverfahren - Kompensationsmeßverfahren mit gesteuerten Düsen - Dehnungsmeßstreifengeräte	
	- Spannkabel	- Kraftmeßdosen - magnetoelastische Kraftaufnehmer, ASEA-Stockholm	
2. Spannung	- Beton	- Hydraulisches Kompensationsmeßverfahren, System Götzl	
3. Temperatur	- Beton - Liner - Panzerrohre - Behälterabschl. - Kühlrohre	- Thermoelemente, z. B. NiCrNi Mantelthermoelemente	
4. Feuchtigkeit	- Beton	- Kapazitive Meßverfahren	
	- Liner - Kühlsystem	- Leckagedetektionssystem, Firmen Krupp, Aktiebolaget Atomenergi	
	- Containment	- Feuchtemessung des Kühlgases mittels Hygrometer	

Bild 3.27: Meßverfahren zur Behälterinstrumentierung bei SBB

Spannungsmessung: Da der Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang im Beton nicht linear ist und Spannungen zusätzlich durch Temperatur-, Feuchte-, Schwind- und Kriechwirkung entstehen, wird zusätzlich im Beton eine Spannungsmessung erforderlich. Das dafür gut geeignete hydraulische Kompensationsmeßverfahren System Götzl /55/ besteht aus einem mit Quecksilber gefüllten Körper, der der Betonspannung ausgesetzt wird und einem Ventil, in dem der Quecksilberdruck durch einen Öldruck kompensiert wird.

Temperaturmessung: Die Temperaturüberwachung im Beton, Liner, Panzerrohr, Kühlrohr und Behälterabschlüssen erfolgt durch eine größere Zahl von Thermoelementen. Als Meßfühler werden wie beim SBB THTR-Untrop beispielsweise NiCr-Ni-Mantelthermoelemente eingesetzt.

Feuchtemessung: Für die Feuchtemessung im Beton bieten sich kapazitive Meßverfahren an. Bei Undichtheiten des Liners oder bei Leckagen der Kühlrohre steigt der Feuchtigkeitsgehalt des Betons hinter dem Liner an, was durch Leckageentdeckungssysteme der Fa. Krupp /28,39/ und der Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm /56/ erfaßt wird. Leckagen können auch durch Feuchtemessungen des Kühlgases mittels Hygrometer z.B. hinter den Kühlgasgebläsen des SBB THTR und PR 500 entdeckt werden, indem ein Bypaß durch eine Box geführt wird.

4. BEISPIELE FÜR SPANNBETONBEHÄLTER

Beispiele dafür, in welcher Form SBB ausgeführt werden können, sind in Bild 4.1 gezeigt, das die SBB der KKW THTR Uentrop, HTR 1160 und PR 500 darstellt. Im folgenden werden die konstruktiven und Auslegungsunterschiede diskutiert.

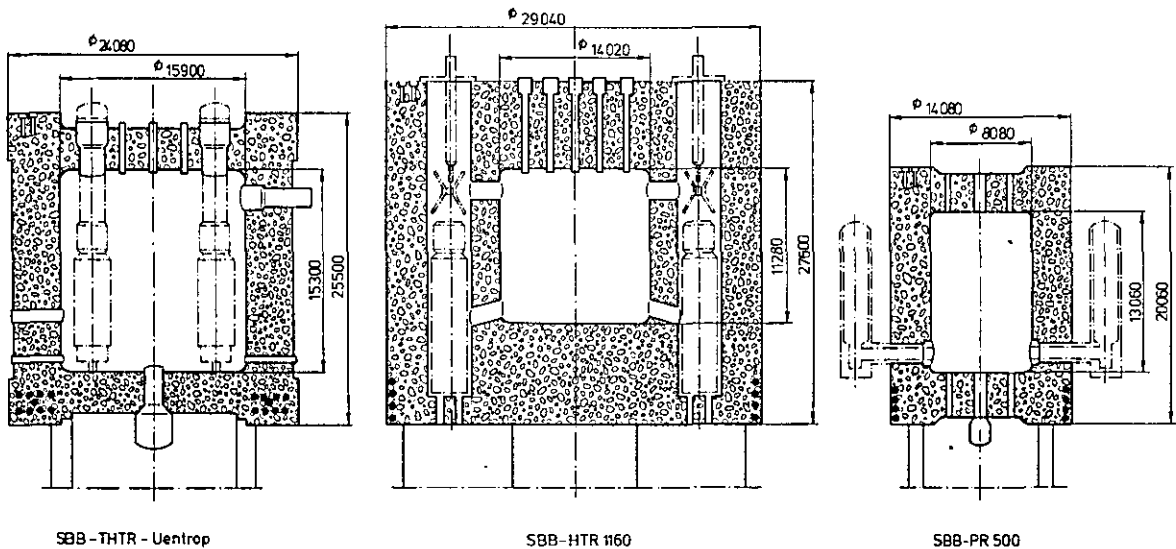


Bild 4.1: Beispiele für die Gestaltung von Reaktordruckbehältern aus Spannbeton an Hand der SBB THTR Uentrop, HTR 1160 und PR 500

4.1 Spannbetonbehälter des Reaktors THTR Uentrop

Dieser Behältertyp ist im THTR-Prototyp 300 MW_{el} KKW in Uentrop zu finden, das von einer Assoziation von Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH mit Euratom und der Kernforschungsanlage Jülich GmbH entwickelt wurde.

Der Bau des KKW im Auftrage der Vereinigten Elektrizitätswerke Westfalen (VEW) begann 1971 und dürfte voraussichtlich 1980 abgeschlossen sein. Näheres darüber kann in /38/ nachgelesen werden.

Der SBB ist in monolithischem Spannbeton ausgeführt und hat die Form eines stehenden Zylinders mit Zylindercore und ebenem Boden und Deckel und nimmt mit Ausnahme der Beschickungsanlage und der Gasreinigung alle Primärkreiskomponenten auf. Hierbei befinden diese sich in einer großen Kaverne. Die Abmessungen des SBB fallen auf Grund der Einkavernenbauweise und des Lisenenspannverfahrens mit 24 m Außendurchmesser und 26 m Außenhöhe sehr groß aus.

Der Betonstützkörper ist armiert und mit Spanngliedern der Güte Sigma 145/160 vorgespannt, wobei die Horizontalvorspannung durch Lisenen gebildet wird.

Zur Gasabdichtung ist an der Behälterinnenseite über Ankerbolzen ein Liner festverankert, der beim Bau gleichzeitig als innere verlorene Schalung dient. Er besteht aus dem Feinkornbaustahl der Güte TTSt E 29, wird im Werk und auf der Baustelle vorgefertigt (Linerboden = 3 Segmente, Linerzylinder = 12 Panels, Linerdeckel = 6 Ringsegmente + 2 Kernsegmente) und am Standort zum Linerkörper verschweißt.

Die Begrenzung der Betontemperatur auf 50°C wird durch eine coreseitig dem Liner vorgesetzte Metallfolienisolierung und durch betonseitig am Liner aufgeschweißte Kühlrohre bewerkstelligt. Das Kühlsystem ist zweifach redundant ausgelegt. Die Metallfolienisolierung besteht aus rostfreien Stahlplatten von 100 mm Dicke, die durch eine Zwischenlage aus Drahtgewebe von 1,2 mm Dicke getrennt werden. Die einzelnen Folien von der Größe 600-700 mm werden paketweise zusammengefaßt und überlappen sich um einige Zentimeter gegenseitig.

Die Behälterdurchführungen werden durch einfache Panzerrohre gebildet, die je nach Erfordernis innen isoliert und außen gekühlt sind.

Für die Behälterabschlüsse der 6 DE-Öffnungen, der 55 Durchführungen für Abschaltstäbe und Instrumentierung, der 6 Durchführungen zur Unterbringung der Kühlgasgebläse, der 2 Durchführungen, die als Mannloch und Ersatzdurchführungen fungieren und des Brennelementabzugrohres verwendet man Doppeldeckel aus Stahl; den Außenabschluß der 10 Förderrohre der Beschickungsanlage bildet ein angeflanschter Armaturenblock, der der 6 Durchführungen der Primärgasführungs- und -entnahmerohre erfolgt in Form eines angeschweißten ebenen Bodens, in welchen wiederum die Kühlgasrohre eingeschweißt sind.

Die Behälterabstützung erfolgt mittels eines Stahlbeton-Ringfundamentes.

4.2 Spannbetonbehälter des Reaktors HTR 1160

Dieser Behälter ist für ein von den VEW 1973 geplantes und nach dem Gulf General Atomic HTR 1160 Reaktor konzipiertes KKW mit 1160 MW_{e1} Leistung in Uentrop vorgesehen. Die Lieferung, Errichtung, Inbetriebnahme und der Probetrieb des KKW sollen vom Lieferkonsortium Brown Boveri & Cie. AG Mannheim und der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH Köln durchgeführt werden. Näheres ist aus /41/ zu entnehmen.

Der SBB ist ebenfalls aus monolithischem Spannbeton in Form eines stehenden Zylinders mit Zylindercore und flachen Enden an Deckel und Boden ausgeführt. Bei diesem ist anstelle der Einkavernenbauweise die Multikavernenbauweise verwirklicht, die durch eine zentrale Kaverne für den Kern und 9 zylindrische Kavernen für DE und Hilfskühlsysteme (NWA) gebildet wird. Im oberen und unteren Behälterbereich verbinden radial angeordnete Kanäle die Kernkaverne mit den DE/NWA-Kavernen. Die Abmessungen, verglichen mit denen des SBB THTR Uentrop, fallen viel günstiger aus und beziehen sich zudem noch auf eine Leistung von 1160 MW_{el} .

Der Betonkörper ist schlaff und vorgespannt bewehrt. Das gesamte Vorspannsystem besteht aus drei Teilen: einem vertikalen Bündelvorspannsystem ohne Verbund um die einzelnen Kavernen, einem vertikalen Vorspannsystem mit Verbund aus Dywidag-Spanngliedern zur Erzeugung einer vertikalen Vorspannung an der Peripherie des SBB und einem Wickelvorspannsystem.

Die Gasdichtheit der Kernkaverne, der seitlichen Kavernen und der radialen Kühlgaskanäle wird durch einen Liner bewirkt, der im Beton formschlüssig fest verankert ist. Er wird wiederum aus Segmenten erstellt und dient beim Betonieren als innere Schalung.

Zur Temperaturbegrenzung von Liner und Beton wird der Liner auf der Gasseite faserisoliert und entsprechend der mechanischen und thermischen Belastung verschiedene Isolierklassen eingesetzt. So wird für den heißgasbeaufschlagten Boden der Corekaverne eine Dreilagenisolierung der Isolierklasse C eingesetzt, die aus den Lagen Al-Si-Fasermatten (Kaowool), Si-Fasermatten und SiO_2 -Blöcken gebildet wird. Für die weniger temperaturbeaufschlagten Linerteile der seitlichen Kavernen genügen weitgehend die Einlagenisolierungen der Isolierklasse A.

Betonseitig wird auf den Liner ein aus Vierkantrohren bestehendes Kühlsystem aufgeschweißt, das 2-fach redundant ausgelegt ist.

Folgende Durchführungen, die als selbsttragende Panzerrohre ausgebildet werden, sind vorhanden: 79 für den Brennelement(BE)-wechsel, 8 für die Komponenten der Heliumreinigungsanlage, 6 für die DE, 3 für das NWA-System, 6 für die nukleare Instrumentierung, 2 als Reflektorelementspeicher, 4 als Speicher für Steuerstabeinheiten, 3 für die Druckmessungen und 4 als Reservedurchführungen.

Für die Abstützung des SBB auf die Fundamentplatte ist eine sternförmige Tragkonstruktion vorgesehen.

Der Behälterabschluß bei den Beladerohren wird durch einfache Stahldeckel, die an den Panzerrohren verschraubt sind, hergestellt. Den Abschluß der DE-Kavernen bilden in Stahl gefaßte Betonstopfen mit Verschraubung an die Panzerrohre. Die Kavernen des NWA-Systems sichern Stahldoppeldeckel ab, und der Primärabschluß der Durchführung für das DE-Bypaß-System wird von einem Stahleinfachdeckel mit doppelten Elastomer-Dichtungen gebildet.

4.3 Spannbetonbehälter des Reaktors PR 500

Dieser Behälter ist bei der Konzeptstudie für ein HTR-KKW mit einer thermischen Leistung von $500 \text{ MW}_{\text{th}}$ zur Erzeugung von Prozeßdampf, die von der Kernforschungsanlage Jülich GmbH in Zusammenarbeit mit der STEAG AG, Essen 1973 erstellt wurde, vorgesehen. Die Anlagenbeschreibung ist in /42/ zu finden.

Der SBB besitzt ebenfalls die Form eines stehenden Zylinders mit flachen Enden und baut auf Grund der nichtintegrierten Bauweise sehr klein, da er neben der Kugelschüttung nur noch die Reflektoreinbauten, die Wärmeisolation und den Coreboden aufzunehmen hat.

Der aus monolithischem Beton erstellte Druckkörper erhält eine schlaaffe und vorgespannte Bewehrung, wobei das von außen aufgebrachte Vorspannsystem in Form einer Wickelvorspannung horizontal und mittels Spannkabel für den Deckel und Boden axial gebildet wird.

Die Funktion Gasdichtheit wird durch einen im Betonstützkörper über ein Netz von Kopfdübelbolzen formschlüssig festverankerten Liner erfüllt. Für den Lineraufbau wird der Linerkörper, segmentiert in Schüssen oder Panels, im Werk vorgefertigt und dient nach der Errichtung als innere, verlorene Schalung für den Betonkörper.

Coreseitig wird der Liner gegen die anstehende Kaltgastemperatur des Primärgases von 260°C isoliert. Isoliermaterial dafür ist Kohlestein von 1 m Dicke, der den Boden, den Zylinder und den Deckel des Liners auskleidet.

Betonseitig auf den Liner und den Panzerrohren aufgeschweißt, befindet sich ein aus Vierkantrohren bestehendes Kühlsystem, wobei das Gesamtsystem aus Sicherheitsgründen in drei parallele Systeme mit jeweils eigener Kühlwasserversorgung und Rückkühlung aufgeteilt ist.

Die Behälterdurchführungen werden mit selbsttragenden Panzerrohren ausgekleidet, die betonseitig ein Kühl- und Verankerungssystem tragen und innen durch

eine Isolierung temperaturgeschützt sind. Durchführungen sind notwendig für: 3 Koaxialrohre, 18 Abschaltstäbe, 1 BE-Abzugsrohr, 1 Mannloch, 6 Beschickungsrohre, 2 Thermoelementrohre und 2 Gasreinigungsanschlüsse.

Die Behälterabschlüsse für das Mannloch, für die Durchführungen der Abschaltstäbe, des Kugelabzugrohres und der Neutronenflußinstrumentierung werden als einfache Stahldeckel ausgeführt, da der gesamte Primärkreis in einem Reaktorschutzgebäude untergebracht ist.

Da unter dem Behälterboden ausreichend Platz für die Einrichtung des Kugelabzuges und für die BE-Wagen vorzusehen ist, steht der Behälter auf einem Ringfundament aus Stahlbeton.

4.4 Bewertung von Behälterkonstruktionen

Eine Bewertung vorangeschilderter Behälterkonstruktionen nach kerntechnischen, bautechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann an dieser Stelle nicht durchgeführt werden, da die Entwicklung eines Bewertungsmodells wie etwa in der VDI-Richtlinie 2225, Blatt 1 /57/ gezeigt oder in /58/ und /28/ durchgeführt einen für dieses Kapitel 4 viel zu großen Raum einnehmen würde und zum anderen die entsprechenden Unterlagen für Konstruktion und Kalkulation in der dazu notwendigen Aufbereitung nicht vorliegen. Es sei jedoch an dieser Stelle kurz auf die praktische Verfahrenstechnik zur exakten System- und damit Behälterbewertung hingewiesen:

Zuerst werden für das zu bewertende System (hier der SBB) Bewertungsmerkmale, das sind Mindestforderungen und Wünsche, aus den Anforderungen abgeleitet und spezifiziert. Systemvarianten bzw. Systemkomponenten und Bewertungsmerkmale bilden die Bewertungsmatrix. Der Grad der Verwirklichung der Bewertungsmerkmale kann rechnerisch oder meßtechnisch erfaßt werden. Da jedoch die Maßeinheiten verschieden sind, wird die Gesamtbewertung des Systems durch Punktvorgabe ermittelt, und zwar mit einer hohen Punktzahl für eine gute Verwirklichung und einer niedrigen Punktzahl für eine weniger gute. Für die Bewertung wird als Bezugsgröße ein System angenommen, das alle Bewertungsmerkmale ideal verwirklicht.

Das zur Beurteilung vorliegende System (SBB) wird dann mit der Ideallösung verglichen und der jeweilige Grad der Annäherung durch eine Punktzahl p festgelegt.

Um nun aus den Bewertungen der Einzelmerkmale eine Bewertung des Gesamtsystems zu gewinnen, wird eine sogenannte technische Wertigkeit x und eine wirtschaftliche Wertigkeit y gebildet, in denen die Summe der Punkte eines Systems (SBB) zur maximal möglichen Punktzahl der Ideallösung in Beziehung gesetzt ist.

Für die technische Wertigkeit der SBB gilt:

$$x = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n \cdot p_{\max}} = \frac{\frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n}}{p_{\max}} = \frac{\bar{p}}{p_{\max}}$$

darin bedeutet:

- $p_1, p_2, p_3 \dots p_n$ = jeweilige Punktzahl für die 1., 2., ... n-te Eigenschaft
- p_{\max} = maximale Punktzahl
- n = Anzahl der bewerteten Mindestanforderungen
- \bar{p} = arithmetischer Mittelwert der Punktzahlen $p_1, p_2 \dots p_n$

Die Ideallösung hat die technische Wertigkeit 1 oder 100 %, die es mit jeder Systemlösung anzustreben gilt.

Im Gegensatz zur technischen Bewertung werden bei der wirtschaftlichen die Kosten als alleiniger Maßstab benutzt, wobei die Herstellkosten H als zweckmäßiger Bezug zur Ermittlung der wirtschaftlichen Wertigkeit y dienen

$$y = \frac{H_i}{H + (E_F)} = \frac{0,7 \cdot H_{\text{zul}}}{H + (E_F)}$$

darin bedeutet:

- H_i = ideale Herstellkosten des Systems SBB
- H = reelle Herstellkosten des Systems SBB
- E_F = Einzelkosten der Fertigung
- 0,7 = Faktor, der auch in wirtschaftlicher Hinsicht eine ausreichende Lebensdauer gewährleistet
- H_{zul} = zulässige Herstellkosten des Systems SBB

5. TECHNISCHE ASPEKTE VON SPANNBETONBEHÄLTERN

Als technische Aspekte im SBB-Bau werden im vorliegenden Kapitel die Abmessungen und Mengen, die Flexibilität von Behälteranordnungen, die Extrapolation von Behälterabmessungen und -anordnungen auf größere Leistungseinheiten, die Sicherheit, die Wiederholungsprüfbarkeit, die Reparierbarkeit und die Abbaubarkeit diskutiert, wobei ausführlicher auf die Wiederholungsprüfung, die Reparatur und auf den Abbau von SBB eingegangen wird.

5.1 Abmessungen und Mengen von SBB

Die Abmessungen und Mengen eines SBB beeinflussen die Bautechnik und die Kosten. Betrachtet man einen einzelnen SBB, so sind für die Abmessungen der Außendurchmesser, die Außenhöhe, die Wandstärken sowie bei Vorhandensein die Kavernenabmessungen maßgebend, während dies bei einer aufgelösten Behälteranordnung der umbaute Raum ist. Die Mengen resultieren hauptsächlich aus den Komponenten Beton, Schlaff- und Spannstahl, Liner-, Kühlrohr- und Isoliermaterial, Panzerrohre und Abschlüsse.

Eine nicht gerade vorteilhafte Stellung nimmt dabei der SBB THTR Uentrop ein: Auf Grund der Einkavernenbauweise tritt ein großer Innendurchmesser auf, was zu einer hohen Vorspannung und zu einer großen Stärke der Abschlußplatten und Zylinderwand führt. Bezieht man das aufgewendete Betonvolumen auf die thermische Reaktorleistung, erhält man dafür eine Kennzahl von $V/N_{th}=13,3$ (siehe letzte Spalte des Bildes 2.5). Der hohe Spannstahlbedarf resultiert aus den durch die Lisenen erforderlichen Überschneidungen. Neben dem hohen Spannstahlbedarf wird eine große Menge an schlaffer Bewehrung zur Aufnahme von Spaltzugkräften in den Verankerungsbereichen erforderlich. Die relativ großen Abmessungen der Behälterwandung sind durch die Unterbringung der Spannkabel bedingt, was auch zum größten, umbauten Raum führt und die Abmessungen des Reaktorgebäudes negativ beeinflusst.

Durch die nichtintegrierte Bauweise und die Anwendung eines anderen Horizontalspannverfahrens, nämlich in Form von aufgewickelten Litzen, umgeht der PR 500-Behälter diese Nachteile und baut damit sehr klein, so daß die Kennzahl $V/N_{th}=5,1$ beträgt.

Der HTR 1160 Behälter weist von der Abmessungs- und Mengenbilanz her die günstigste Kennzahl $V/N_{th}=4,6$ auf, benötigt aber große Mengen an Linermaterial

und Wärmeschutzteilen, die auf Grund der auszukleidenden Kavernen hier am höchsten liegen.

5.2 Flexibilität von Behälteranordnungen

Diese Anforderung drückt die Empfindlichkeit der vorliegenden Behälterkonstruktion gegenüber Änderungen in der Verwendung oder Gestaltung aus, die auf Grund fortgeschrittener Bearbeitung erforderlich sind.

Diese Empfindlichkeit ist bei den Behältern THTR Uentrop und HTR 1160 auf Grund der Lisenenvorspannung und der Multikavernenbauweise groß und wird beim PR 500 Behälter durch die nichtintegrierte Anordnung der DE verkleinert, die eine Gestaltungsänderung der DE z.B. zuläßt.

5.3 Extrapolation von Behälterabmessungen und -anordnungen auf größere Leistungseinheiten

Betrachtet wird der Abstand der Abmessungen zu Grenzwerten, die mit dem jeweiligen Behälterkonzept erreichbar sind.

Auf Grund der niedrigen Kennzahlen V/N_{th} von 4,6 bzw. 5,1 weisen die Behälter der Reaktoren HTR 1160 und PR 500 gute Extrapolationsmöglichkeiten auf. Dies wird um so deutlicher, vergleicht man sie mit den Kennwerten französischer und britischer SBB. Bei den Reaktoren EDF 4, Bugey 1 und Oldbury liegen die Kennzahlen für die entsprechenden SBB bei $V/N_{th} = 7,0$ bis 22,2 und die Behälteraußendurchmesser bei ca. 34 m bei Behälterhöhen von 53 m.

5.4 Sicherheitsanforderungen

Den Sicherheitsanforderungen wird durch eine ausreichende, festigkeitsmäßige Anbindung aller Behälterkomponenten, einer auch im Störfall vorhandenen Berstsicherheit, einer bei Katastrophenfällen genügenden Abschirmung und bei der Herstellung des SBB laufenden Qualitätssicherung Rechnung getragen.

Auf die Qualitätssicherung eines SBB haben mehrere Stellen Einfluß; in der Hauptsache das den Bau des KKW projektierende Generalunternehmen, der Hersteller und die Lieferanten des SBB sowie der Technische Überwachungsverein.

Nach /7/ sind dabei für die einzelnen SBB-Komponenten Vorprüfungen, Eignungs-, Werkstoff-, Überwachungs- und Abnahmeprüfungen durchzuführen (Bild 5.1).

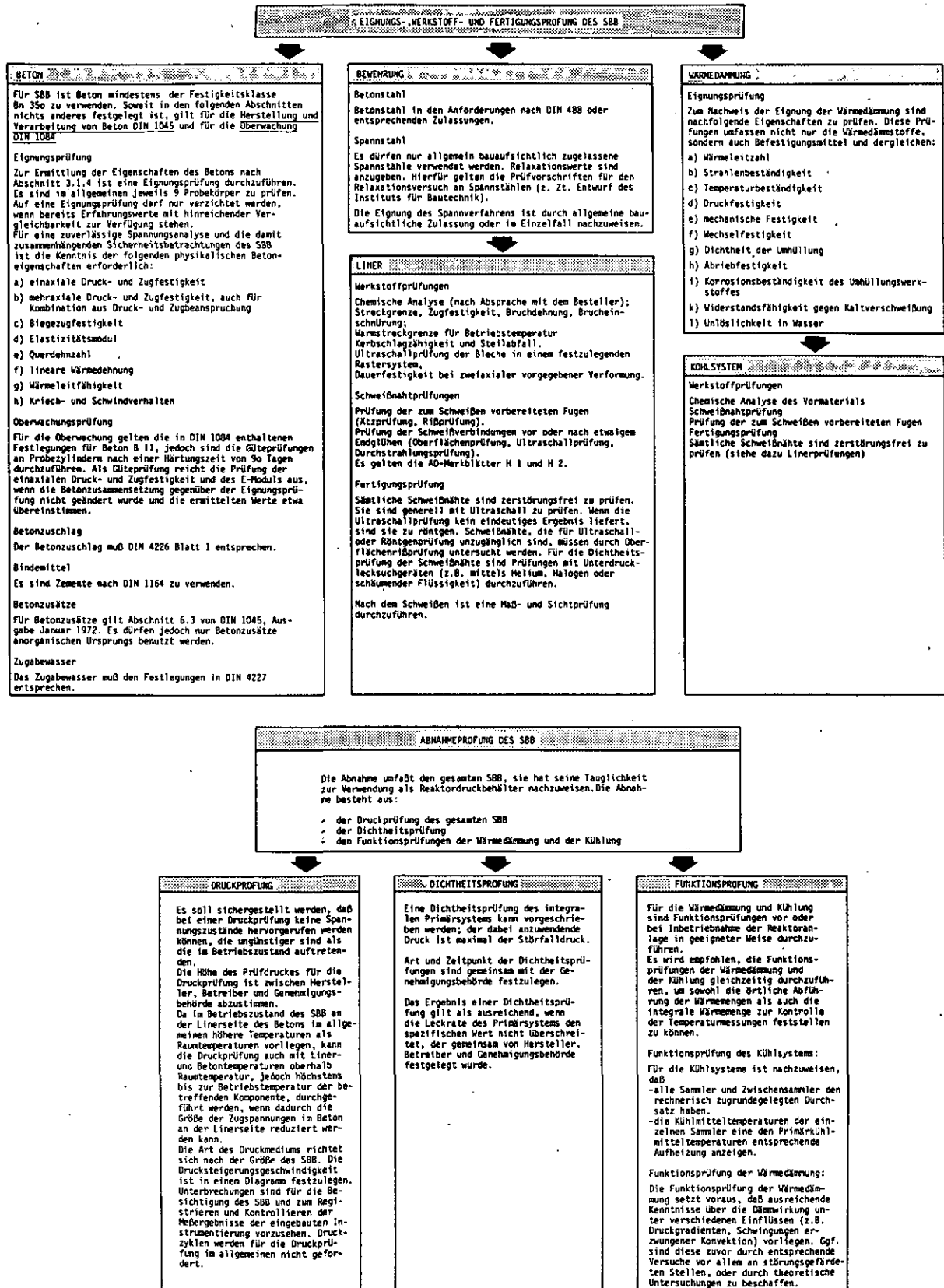


Bild 5.1: Prüfarten im SBB-Bau

Als weiterer Sicherheitsfaktor wird die Abschirmung des Betons gegenüber γ -Strahlen, schnellen und thermischen Neutronen betrachtet. Die durch diese Bestrahlung im Beton induzierte Aktivierung ist ein wichtiger Faktor für die konstruktive und festigkeitsmäßige SBB-Auslegung, für die Ausbildung von Wartungs- und Inspektionszonen und für die Kalkulation der Abbruchkosten eines SBB. Die Abschirmung des Betons für Neutronen und γ -Strahlen bezogen auf die Wandstärke des SBB zeigt Bild 5.2 /9/.

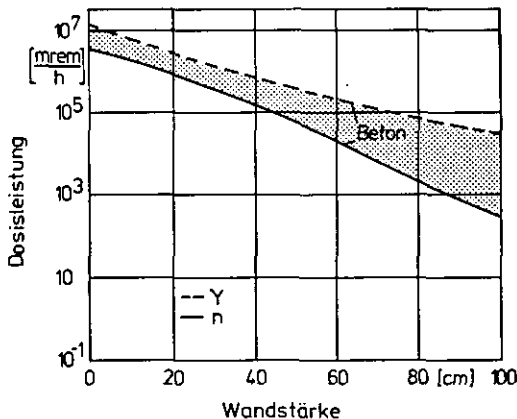


Bild 5.2:

Abschirmwirkung von Beton gegenüber γ -Strahlen und thermischen Neutronen

Ausgehend von Schätzungen, die in den KKW Niederaichbach, Wylfa und Hartlepool /60/ vorgenommen wurden und mittels Abschirmberechnungen /61/ ist festzustellen, daß der aktivierte Bereich im SBB auf eine innenliegende Schicht bis ca. 80 cm begrenzt ist. An der Außenseite eines SBB liegt demnach eine Dosisleistung von 7 mrem/h an, wenn auf die Innenwand eine Strahlung der Dosisleistung von 10^7 mrem/h trifft. Diese Aktivierung von 7 mrem/h liegt innerhalb der für Wartungs- und Inspektionszonen zulässigen Grenze von 10 mrem/h.

5.5 Wiederholungsprüfbarkeit von Linern

Wiederholungsprüfungen und Inspektions- und Wartungsarbeiten sind eine wesentliche Voraussetzung dafür, großtechnische Anlagen über längere Zeiträume betriebssicher zu erhalten. Dies gilt ebenso für den SBB. Nach /12/ gehören zu dieser Wiederholungsprüfung die Prüfung der Betriebsgeschichte, der Sicherheitseinrichtungen, der Meßeinrichtungen und Registriergeräte. Umfang und zeitlicher Abstand dieser Wiederholungsprüfungen sind von Fall zu Fall in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden festzulegen.

Ein zentrales Problem stellt z. Zt. die Wiederholungsprüfbarkeit des Liner-Wärmeschutzsystems dar, das beim Kalten Liner-Wärmeschutzsystem durch den Vorbau der Wärmeisolation nicht oder nur durch Entfernen der Isolierung wiederholprüf-

bar ist. Um eine einfache Wiederholungsprüfbarkeit zu erreichen, sind und werden z. Zt. dazu entsprechende Liner-Wärmeschutzsysteme entwickelt. Lösungsmöglichkeiten stellen folgenden Wärmeschutzsysteme dar:

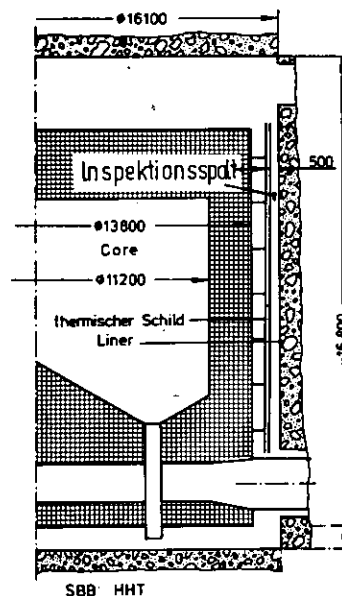
- heißes Liner-Wärmeschutzsystem
- warmes Liner-Wärmeschutzsystem
- kaltes Liner-Wärmeschutzsystem mit Inspektionsspalt

Wiederholungsprüfbarkeit beim heißen Liner-Wärmeschutzsystem: Bei diesem Konzept wird der zu inspizierende Liner vor die Isolierung (meist aus Beton) gesetzt (siehe dazu Bild 3.14), so daß er ohne Abbau der Isolierung frei zugänglich ist.

Wiederholungsprüfbarkeit beim warmen Liner-Wärmeschutzsystem: Diese Konzept löst die Problematik der Inspizierbarkeit des Liners eigentlich auf die gleiche Weise wie beim heißen Liner-Wärmeschutzsystems, nur mit dem Unterschied, daß zur niedrigeren Temperaturbelastung des Liners 100 bis 150-gradiges Helium zur Kühlung verwendet wird.

Angewendet wird dieses Konzept beim SBB HHT /62,63/ (Bild 5.3), bei dem der Liner durch einen Inspektionsspalt von ca 0,7 m zwischen diesem und dem thermischen Schild fernbedienbar inspizierbar ist. Die Inspektion und Wartung wird jährlich durchgeführt.

Bild 5.3:
Inspektions- und Reparaturspalt beim SBB HHT



Wiederholungsprüfbarkeit beim kalten Liner-Wärmeschutzsystem: Dieses Konzept kennt zwei Anordnungsmöglichkeiten der Isolierung (Bild 5.4). Die eine sieht die Isolierung direkt vor dem Liner (coreseitige Anordnung) vor, wie es beim SBB HTR-K der Fall ist /63/64/, jedoch ist eine sehr leicht abnehmbare Iso-

lierung vorgesehen, was durch einfaches Lösen von Befestigungsmuttern erreichbar ist. Der Liner ist dann nach Entfernung der Isolierung inspizierbar. Nach dem Abbau der Isolierung ergibt sich für die Inspektion ein Spalt von ca. 0,6 m, der für Inspektionswerkzeuge zugänglich wäre (Bild 5.4.1).

Eine zweite Anordnungsmöglichkeit ergibt sich aus der Platzierung der Isolierung außen auf dem thermischen Schild, wobei zwischen dem thermischen Schild und dem Liner ein Ringspalt von ca. 0,7 bis 1 m vorgesehen wird. An Hand eines SBB für einen Reaktor der 3000 MW_{th}-Klasse ist diese Anordnung in Bild 5.4.2 dargestellt.

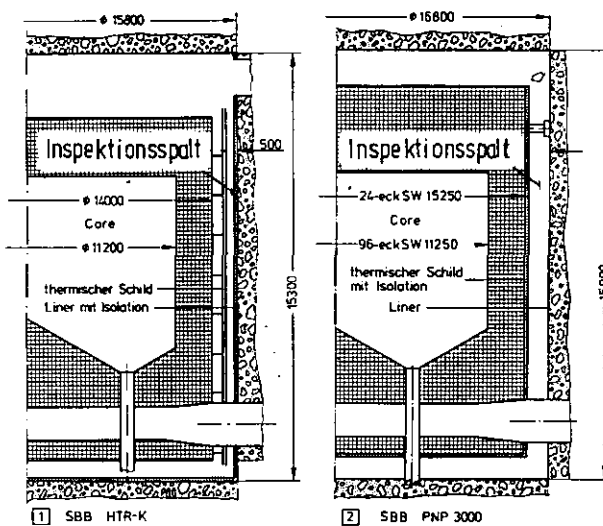


Bild 5.4:

Inspektions- und
Reparaturspalt beim
SBB HTR-K und PNP 3000

5.6 Reparierbarkeit von Linern

Aus wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Gründen fordern die Betreiber von KKW die Möglichkeit der Reparatur von Anlagekomponenten. Bezieht man diese Forderung auf den SBB und dessen Komponenten, so ist damit vorwiegend die Reparierbarkeit des Liners angesprochen.

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich dabei auf den Liner in kaltgehender Auslegung mit Isolationsbeschlag. Betrachtungen über heißgehende Liner sind u. a. aus /65/ zu entnehmen.

5.6.1 Ursachen einer Reparatur

Die unterschiedlichen Betriebszustände eines Reaktors verursachen im Liner verschiedene Belastungszustände, wozu vor allem die Einzellastfälle der Vorspannung, des Innendruckes, der Temperatur und des Kriechens und Schwindens eine bedeutende Rolle einnehmen. Auf Grund dieser Lastfälle kann es theoretisch zu einem Linerversagen kommen.

Nach einer Untersuchung /66/ sind als kritische Linerstellen die Stellen anzusehen, in denen sich die größten Spannungen konzentrieren bzw. die gestörte Spannungsausbildungen aufweisen. Das sind einmal die torusförmigen Übergänge vom Zylinderliner zum Decken- und Bodenliner, weiterhin alle geschweißten Stellen und schließlich heiße Stellen (hot spots), die sich durch lokales Abplatzen der vor dem Liner sitzenden Isolierung ergeben können.

5.6.2 Lecksuchverfahren

Das Aufsuchen eines Linerlecks stellt eines der größten Probleme im Komplex "Linerreparatur" dar. Zur Lecksuche sind prinzipiell die Leckagedetektion, die Ultraschall-Lecksuche und die Prozeßgrößenüberwachung einsetzbar. Im Hinblick auf den zeitlichen Einsatz können diese Lecksuchverfahren gelegentlich oder laufend zur Anwendung gelangen (Bild 5.5).

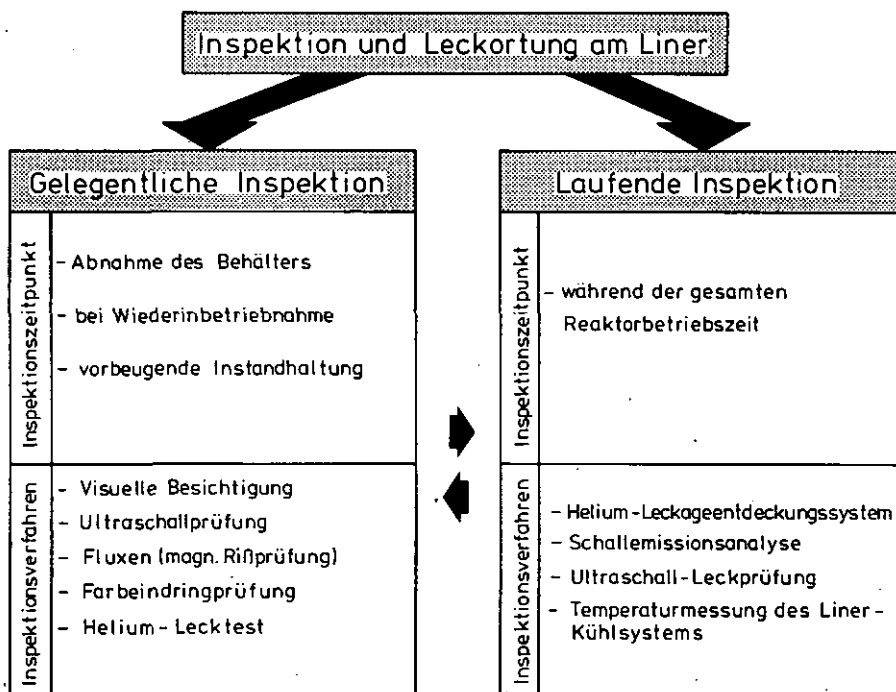


Bild 5.5: Inspektions- und Lecksuchverfahren für SBB-Liner

Gelegentliche Inspektion: Die nur diskontinuierlich durchgeführte Linerinspektion wirkt nicht im Sinne einer Schadensfrüherkennung und scheidet somit für weitere Betrachtungen aus.

Laufende Inspektion: Diese Inspektionsart erfüllt die Forderung nach Schadensfrüherkennung dergestalt, daß die Lecksuchverfahren während der gesamten Reaktorbetriebszeit eingesetzt werden. Im einzelnen sind das folgende Verfahren:

Heliumleckageentdeckungssystem : Bei Undichtheiten im Liner tritt das Kühlmittel Helium in den Beton ein. Detektionskanäle, die ein quadratisch im Beton in Linernähe verlegtes Rohrsystem bilden, nehmen das Leckagehelium auf und bringen es im entsprechenden Detektionskanal über Absperrorgane, Sammler und einer Vakuumpumpe zur Anzeige. In Bild 5.6 ist die Bauart der Gesellschaft für Hochtemperaturtechnik (GHT) /66/ dargestellt. Die Detektionskanäle bestehen hier aus perforierten Rohren, die auf der Linerrückseite aufgeschweißt sind. Z. Zt. werden auch weitere Untersuchungen mit Betonkanälen, Detektionsrohren mit Schnüffelnstutzen und Detektionskanälen aus Styropor unternommen.

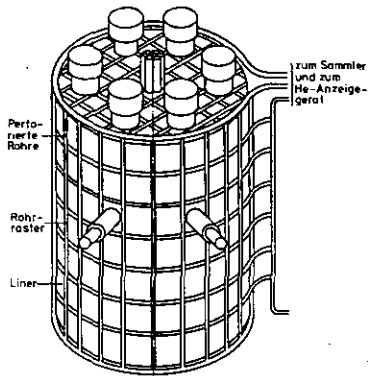


Bild 5.6:

Anordnung von Detektionskanälen mit Perforationen am Liner eines SBB zur Heliumleckageentdeckung

Schallemissionsanalyse: Die Lecksuche mittels Schallemission arbeitet im Gegensatz zur Ultraschallprüfung nur mit einem Empfänger, der einen Schall bei einer plötzlichen Energieumwandlung aufnimmt. Dies ist bei einer Rißentstehung im Liner der Fall, wo die freiwerdende Bindungsenergie der Metallatome in Schall- und Wärmeenergie umgewandelt wird. Die vom Linerwerkstoff emittierten Schallimpulse werden von Sonden (Bild 5.7) /67/, in der Regel piezoelektrische Aufnehmer, in elektrische Signale umgewandelt und danach verstärkt.

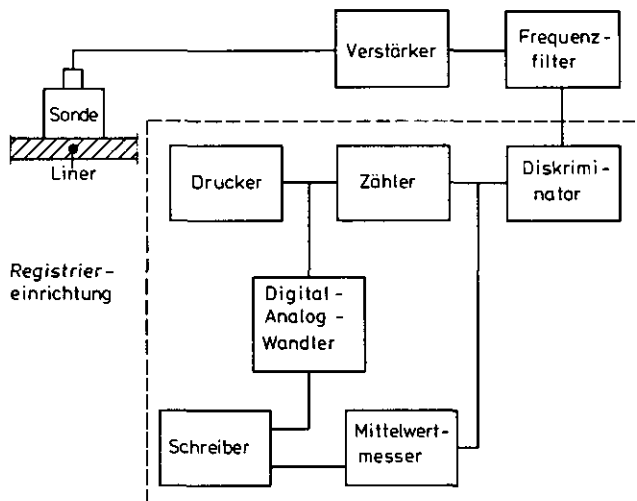


Bild 5.7:

Rißortung am Liner mittels Schallemission

Bevor sie der Meßeinrichtung zugeleitet werden, schaltet ein Frequenzfilter die Störgeräusche aus und verbessert das Signal-Untergrund-Verhältnis. Die Registriereinrichtung besteht aus Diskriminator, Zähler und Ausgabeeinheit. Am Diskriminator wird die Ansprechschwelle für die resonanten Oberschwingungen der Aufnehmer eingestellt. Nur diese Oberschwingungen werden gezählt, wobei die Anzahl digital über einen Drucker oder analog über einen Schreiber mittels Digital-Analog-Wandlers angezeigt wird.

Ultraschall-Leckprüfung: Durch das Austreten des Heliums aus einem Linerleck entstehen an der Leckagestelle durch Ablösung von Wirbeln bzw. durch Kollision von ruhenden mit strömenden Molekülen akustische Schwingungen. Diese Schwingungen werden sowohl in der umgebenden Atmosphäre wie auch im Liner selbst weitergeleitet. Sie liegen vornehmlich zwischen 35 und 45 kHz und können als unhörbarer Schall mittels Richt- oder Kontaktmikrofon in direkter oder indirekter Meßweise /100/ erfaßt werden.

Temperaturmessung des Linerkühlsystems: Bei einem Linerleck erwärmt das Leckagehelium das Linerkühlwasser im nahegelegenen Kühlrohr. Die auf die Kühlrohre installierten Temperaturmeßgeräte weisen dazu diese Temperaturerhöhung aus.

5.6.4 Reparaturvorgang

Der Reparaturvorgang richtet sich nach dem Linerkonzept sowie nach Größe und Art der Beschädigung. Als denkbare Schadensfälle können beim kalten Liner Wärmeschutzsystem ein kleiner Riß, der nach Abbau der Isolierung verschweißt werden kann, ebenso beim kalten Liner Wärmeschutzsystem ein großer Riß, der einer Auswechslung der schadhaften Linerfläche bedarf und beim heißen Liner Wärmeschutzsystem ein Ankerbolzenversagen mit Auswechslung des schadhaften Verbundes Linerblech/Ankerbolzen betrachtet werden.

Für den erstgenannten Schadensfall, also kleiner Riß beim kalten Liner Wärmeschutzsystem wird nachfolgend der Reparaturvorgang tabellarisch aufgeführt und in Bild 5.8 bildlich dargestellt

- nach der Fehlerfeststellung wird die Metallfolienisolierung durch Lösen der Befestigungsmuttern, Abtrennen eines flächenmäßig begrenzten Isolierpaketes und Abheben der Coverplates entfernt
- Ausschleifen und Schweißen der Rißstelle
- Dichtheitsprüfen der Schweißstelle mittels Ultraschallprüfung
- Aufbringen einer Ersatzisolierung

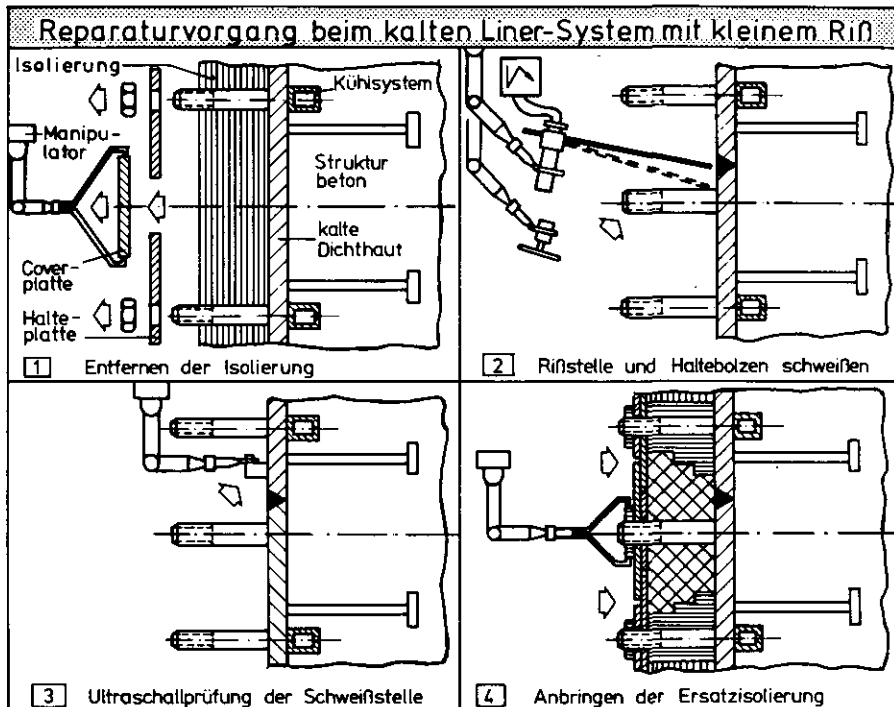


Bild 5.8: Möglicher Reparaturvorgang beim kalten Liner-Wärmeschutzsystem mit kleinem Riß

5.7 Abbaubarkeit von SBB

Spricht man über die Demontage eines SBB, so ist bei einer Betrachtung dieser Problematik das ganze KKW zu sehen. Die in der Bundesrepublik im Bau befindlichen oder installierten KKW sind zwar erst am Anfang ihrer kommerziellen Phase bzw. treten in Kürze in sie ein, doch gibt es bereits schon heute verschiedene Gründe, sich mit der Stilllegung von KKW zu beschäftigen, zumal auch die Bundesregierung in den 1974 veröffentlichten Sicherheitskriterien für KKW im Kriterium 2.10 "Stilllegung und Beseitigung von KKW" folgende Forderung erhebt: KKW müssen so beschaffen sein, daß sie unter Einhaltung der Strahlenschutzbedingungen stillgelegt werden können. Ein Konzept für eine Beseitigung nach der endgültigen Stilllegung unter Einhaltung der Strahlenschutzbestimmungen muß vorhanden sein.

5.7.1 Gründe für die Stilllegung

Studien der Vereinigung der Elektrizitätswerke (VDEW) /69/, angeregt durch die Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) sowie der Nuklear-Ingenieur-Service GmbH (NIS) zur Stilllegung von KKW führen nachfolgende Gründe auf:

- Erreichen des Endes der KKW-Lebensdauer
- Unwirtschaftlich arbeitende Anlagen (zunehmende Betriebserschwerisse)
- Notwendigkeit größerer Reparaturen
- Nachträgliche Behördenauflagen zur Erhöhung des sicherheitstechnischen Standes des KKW, wozu der Erfüllungsaufwand nicht mehr wirtschaftlich ist
- Eintreten eines größeren Störfalles, der die Stilllegung des KKW notwendig macht
- Beendigung des Teststadiums bei Versuchs-KKW
- Eine rasche Markteinführung eines bestimmten Reaktortyps stoppt die Entwicklung der Versuchsanlagen anderer Reaktorsysteme

5.7.2 Bedeutung der Stilllegung

Welche Bedeutung die Stilllegung hauptsächlich für die EVU hat, kann folgendermaßen formuliert werden:

- Auftreten spezifischer Probleme, die durch das radioaktive Inventar des KKW bedingt sind
- Bildung von notwendigen Rückstellungen für die zu erwartenden Stilllegungskosten bei den EVU
- Berücksichtigung stilllegungsfreundlicher Merkmale bereits bei der Planung und Konstruktion von KKW, um die Stilllegungskosten so klein wie möglich zu halten
- Wiedergewinnung des Standortes für neue KKW auf dem das stillgelegte steht

5.7.3 Stilllegungsvarianten

Die Stilllegungsvarianten von KKW ergeben sich aus der Art und Weise, wie das KKW-Inventar verwahrt wird, ob es sicher eingeschlossen oder beseitigt wird.

Nach /70/ unterscheidet man folgende Stilllegungsvarianten (Bild 5.9):

- Gesicherter Einschluß
- Teilbeseitigung mit gesichertem Resteinschluß
- Totale Beseitigung

Gesicherter Einschluß: Das Erscheinungsbild des KKW bleibt hierbei unverändert. Eine Sicherheitshülle schließt die festen und unlöslichen, radioaktiven Substanzen am Standort langfristig ein, die sicherheitstechnisch während der gesamten Einschlußzeit überwacht werden.

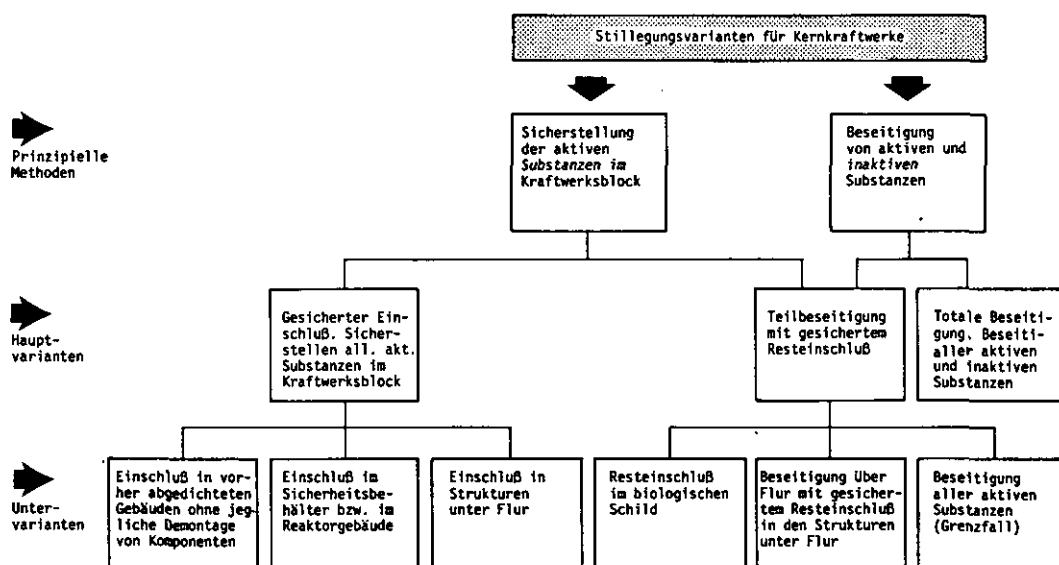


Bild 5.9: Stillegungsvarianten für KKW

Teilbeseitigung mit gesichertem Resteinschluß: Bei dieser Variante wird ein Teil der aktiven und inaktiven Anlagekomponenten beseitigt. Die festen und unlöslich radioaktiven Komponenten werden wie bei Variante 1 am KKW-Standort langfristig eingeschlossen und die niedrig aktivierten Komponenten einem Lager zugeführt.

Totale Beseitigung: Alle aktiven und inaktiven Anlagekomponenten werden beseitigt und einem externen Lager zugeführt. Der freiwerdende Standort kann für andere Zwecke benützt werden.

Für den speziellen Fall ist es naheliegend, entsprechend den vorliegenden Verhältnissen, Kombinationen aus den aufgeführten Stillegungsvarianten zu bilden.

5.7.4 Stillgelegte KKW-Anlagen

Bild 5.10 zeigt eine Anzahl stillgelegter KKW und deren Stillegungsvarianten. Die meisten von ihnen wurden in den USA stillgelegt, wobei alle Stillegungsvarianten angewendet wurden. In der Bundesrepublik Deutschland wurde bisher noch kein KKW stillgelegt, doch ist bei dem 1974 außer Betrieb genommenen KKW-Niederaichbach der gesicherte Einschluß vorgesehen. Auch der Heißdampfreaktor in Großwelzheim wird in Kürze stillzulegen sein.

Name der Anlage	Reaktortyp	MW _{th}	Stilllegungsvariante
Hallam Nuclear Power Facility (HNPF), USA	Graphitmoderierter, natriumgekühlter Reaktor	256	Teilbeseitigung mit gesichertem Resteinschluß
Elk River Reactor (ERB), USA	SWR mit fossiler Überhitzung	58	Totale Beseitigung
Boiling Nuclear Superheater Reactor (BONUS), USA	SWR mit nuklearer Überhitzung	50	Gesicherter Resteinschluß (Museum)
Pathfinder Atomic Power Plant, USA	SWR mit nuklearer Überhitzung	190	Gesicherter Einschluß (Anlage läuft heute mit fossiler Kesselanlage)
Carolinas Virginia Tube Reactor (CVTR), USA	Schwerwassermoderierter Druckröhren-Reaktor	64	Gesicherter Einschluß
Pigua Nuclear Power Facility (PNPF), USA	Organisch moderierter und gekühlter Reaktor	45	Gesicherter Einschluß (Einige Gebäude werden als Lager u. Büros benutzt)
Versuchsatomkraftwerk Lucens, Schweiz	Schwerwassermoderierter CO ₂ -gekühlter Druckröhren-Reaktor	30	Teilbeseitigung mit gesichertem Resteinschluß
Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN), BRD	Schwerwassermoderierter CO ₂ -gekühlter Druckröhren-Reaktor	320	Gesicherter Einschluß im Reaktorgebäude

Bild 5.10: Beispiele stillgelegter KKW

5.7.5 Durchführung der Stilllegung

Ausschlaggebend für die Aufwendigkeit der gewählten Stilllegungsvariante ist das Aktivitätsinventar des KKW. Dabei wird das Gesamtinventar verursacht durch die Aktivierung von Strukturmaterialien, die unmittelbar der Neutronenstrahlung ausgesetzt sind, der Aktivierung von Betriebsmedien und Korrosionsprodukten durch Neutronenstrahlung und durch die aus den BE freigesetzten Spaltprodukte und -stoffe. Es schlägt sich vorwiegend im Druckbehälter, in den -einbauten, in den Haupt- und Nebensystemen und im radioaktivem Filtermaterial nieder /70/ (Bild 5.11).

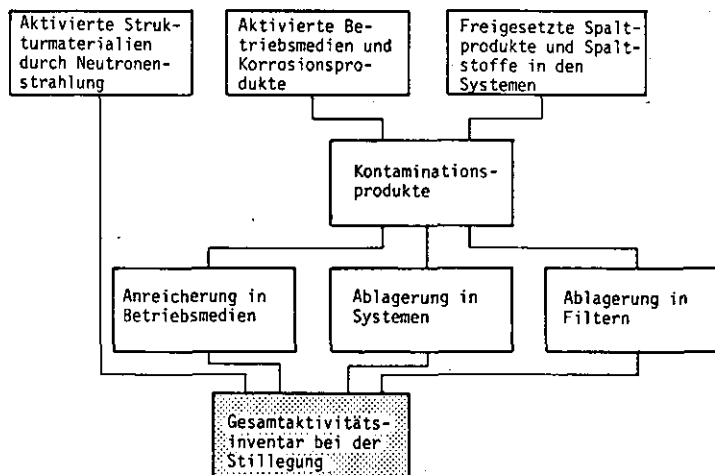


Bild 5.11:
Zusammensetzung
des Aktivitäts-
inventars

Soll der SBB völlig beseitigt werden, ist die zur Zeit des Abbruches vorhandene Gesamtaktivität der Komponenten von Bedeutung, also nach einer bestimmten Betriebs- und Abklingzeit.

Um eine Vorstellung über die Aktivierung der KKW-Bauteile und ihr Abklingverhalten zu vermitteln, ist in Bild 5.12 /70/ eine qualitative Darstellung gegeben, deren Kurvenverläufe sich aus der Extrapolation des Aktivitätsinventars der KKW Obrigheim (KWO, 350 MW, DWR) und Grundremmingen (KRB I, 250 MW, SWR) ergaben.

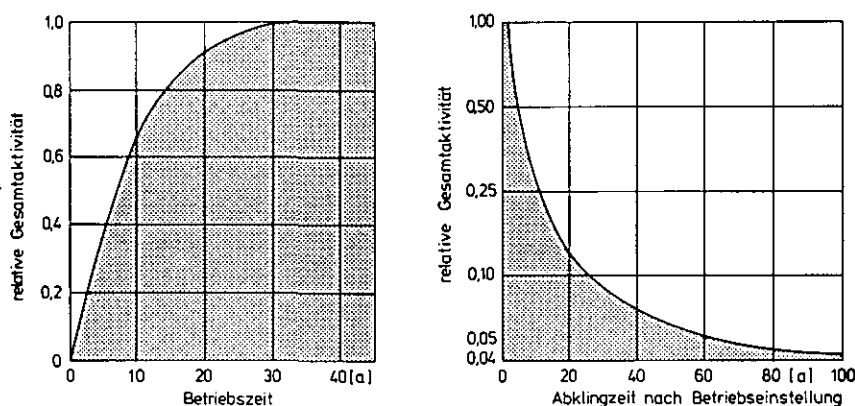


Bild 5.12:

Relative Gesamtaktivität in Abhängigkeit der Betriebs- und Abklingzeit für KKW

Aus den Berechnungen geht hervor, daß das Gesamtinventar in ca 40 Betriebsjahren bei einem Lastfaktor von 0,8 praktisch den Sättigungswert erreicht hat und fällt nach Betriebseinstellung des Reaktors wie oben gezeichnet ab. So beträgt das Aktivitätsinventar beim KKW Obrigheim (KWO) nach 40 Betriebsjahren und einem Jahr Abklingzeit $4,5 \cdot 10^6$ Ci.

Bezieht man die Aktivitätskonzentration speziell auf den SBB, so ist diese SBB-Aktivität abhängig von der Art und Zusammensetzung des aktivierten Materials (kalzitischer oder quarzitischer Beton und Bewehrungsstahl), vom Abstand der Meßstelle Beton/Liner und von der Abklingzeit. Für den SBB THTR Uentrop sind in Bild 5.13 die Aktivitätskonzentrationen in Ci/m^3 von Bewehrungsstahl und kalzitischem Beton nach 6 und 30 Jahren Abklingzeit dargestellt /60/.

Bringt man diese vorliegenden Aktivitätskonzentrationen mit den gesetzlich festgelegten Freigrenzen der Aktivitätskonzentrationen zum Schnitt, so erhält man sogenannte kritische Aktivierungstiefen. Dies sind Schichtdicken im SBB, in denen die zulässigen Aktivitätskonzentrationen überschritten werden. Für Beton betragen sie $4,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ci/cm}^3$ und für Stahl $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ci/cm}^3$.

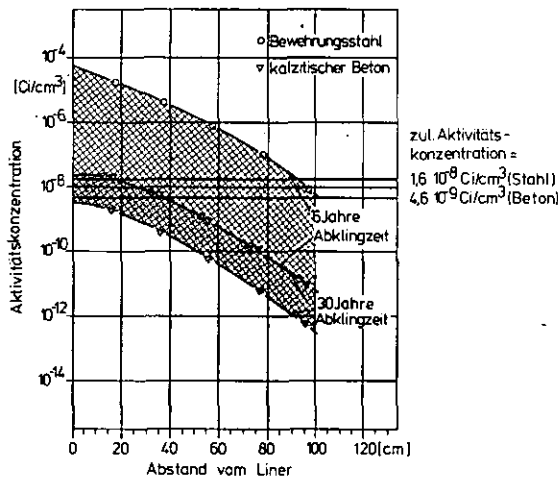


Bild 5.13:

Aktivitätskonzentrationen von Bewehrungsstahl und kalzitischem Beton für Neutronenflüsse des SBB THTR Uentrop in Abhängigkeit der Abklingzeit und der Betonschichttiefe

Für die SBB Wylfa, Hartlepool und THTR Uentrop sind in Bild 5.14 diese kritischen Aktivierungstiefen dargestellt /60/, die nach einer entsprechenden Abklingzeit für den Abbruch des SBB maßgebend sind.

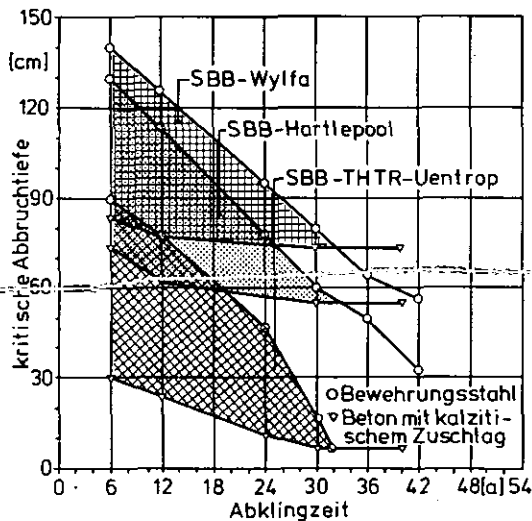


Bild 5.14:

Aktivierungstiefen als Funktion der Abklingzeit von kalzitischem Beton und Bewehrungsstahl für verschiedene SBB

Um sicher zu gehen, daß zum Abbruchzeitpunkt weder vom Beton noch vom Bewehrungsstahl die zulässigen Aktivitätskonzentrationen überschritten werden, müssen die kritischen Aktivierungstiefen von Beton und Stahl gleich sein. Damit ergeben sich für die SBB Wylfa, Hartlepool und Uentrop folgende sinnvolle Abklingzeiten mit kritischen Aktivierungstiefen /60/ Bild 5.15:

Reaktortyp/SBB	Betonzuschlag	sinnvoll Abklingzeit(Jahre)	zugehörige kritische Aktivierungstiefe(cm)
1. Wylfa	kalzitisch	33	70
2. Hartlepool	kalzitisch	33	55
3. THTR-Uentrop	kalzitisch	33	10

Bild 5.15:

Abklingzeiten und zugehörige kritische Aktivierungstiefen verschiedener SBB

Für das zu wählende Abbruchverfahren /60/ eines SBB sind folgende Randbedingungen von Entscheidung (Bild 5.16):

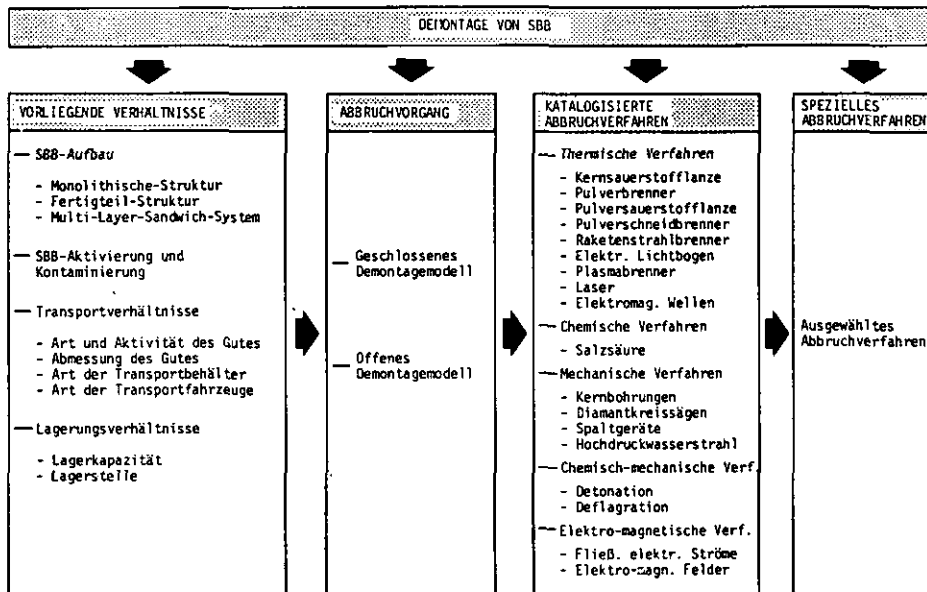


Bild 5.16: Grundsätzliche Abbaumöglichkeiten von SBB - Verfahrensauswahl

SBB-Aufbau: Für den Abbruch ist es wichtig zu wissen, welcher SBB-Aufbau vorliegt. Bietet die Fertigteilweise gegenüber der monolithischen beim Aufbau gewisse Vorteile, so ist dies beim Abbruch nicht der Fall, da nach der Fertigstellung eines aus Fertigteilen aufgebauten SBB wiederum ein Monolith vorliegt, bei dem aktivierte und nichtaktivierte Schichten fest miteinander verbunden sind.

SBB-Aktivierung und Kontaminierung: Die Aktivierungshöhe der strahlenbeaufschlagten SBB-Komponenten Beton, schlaaffe und vorgespannte Bewehrungsstähle, Liner und Isolierung hängt von ihrer örtlichen Lage zur Strahlenquelle, der Betriebszeit und der Abklingzeit nach KKW-Abschaltung ab (siehe Bilder 5.12 bis 5.14).

Transportverhältnisse: Auf Grund der verschiedenen SBB-Komponenten liegen auch nach Abbruch Beton- und Linerstücke sowie Bewehrungs- und Spannstähle vor, die abzutransportieren sind. Die Abmessungen dieser Abbruchstücke sind an die Transportbehälter anzupassen, wie sie für die Lagerung von radioaktiven Abfällen im Salzbergwerk Asse Verwendung finden. Für schwach radioaktive Abfälle sind das Blechtrommeln und Rollensickenfässer mit 200 bis 400 ltr. Fassungsinhalt. Für den Transport dieser Abbruchstücke kommen Eisenbahnwaggons und -container sowie Lastkraftwagen zum Einsatz, wozu vorab eine besondere Genehmigung (Strahlenschutzverkehrsordnung) einzuholen ist.

Lagerungsverhältnisse: Die einzige Einlagerungsstätte für radioaktive Substanzen in der Bundesrepublik Deutschland ist das Salzbergwerk Asse. Ob die Aufnahmekapazität dieses Salzbergwerkes für solche Abbruchteile von SBB ausreichend ist, scheint fraglich, da der Abbruch nur eines SBB vom Typ THTR Uentrop alleine vom Beton her mit $10\,000\text{ m}^3$ 50 000 Fässer mit 200 ltr. Fassungsvermögen verursacht.

Demontagemodelle: Durch die Trennung der aktivierten von der nicht aktivierten SBB-Schicht gelangt man zu zwei verschiedenen Abbruch- bzw. Demontagemodellen, dem geschlossenen und dem offenen Demontagemodell.

Beim geschlossenen Demontagemodell wird der Abbruch von innen nach außen betrieben, d. h. von aktiv nach inaktiv, wobei der äußere nichtaktivierte SBB-Teil als Schutz dient. Dieses Demontagemodell eignet sich für begehbare SBB.

Beim offenen Demontagemodell arbeitet man von oben nach unten und von außen nach innen, d. h. von inaktiv nach aktiv. Dafür können vorhandene Krananlagen verwendet werden. Eine Wasserfüllung des SBB würde die Verschleppungsgefahr radioaktiver Staube und Flüssigkeiten verhindern, setzt aber voraus, daß das Containment absolut dicht ist.

Abbruchverfahren: Die Abbruchverfahren bedienen sich der Hitze, Säuren, mechanischer Kräfte oder elektrischer Ströme. Im einzelnen sind dies:

Thermische Verfahren: Der größte Teil dieses Verfahrens bringt den Beton durch hohe Temperaturen zum Schmelzen. Der andere Teil zerstört den Beton durch Hitzeschocks unterhalb des Schmelzpunktes des Betons und zerstört somit sein Gefüge. Die Festigkeit des Betons wird herabgesetzt und er zerfällt. Davon unberührt bleiben die Bewehrungsstäbe und müssen mit anderen Verfahren abgebaut werden. Eine denkbare Abbruchkonstruktion mit Anwendung eines thermischen Abbruchverfahrens nach dem offenen Demontagemodell ist in Bild 5.17 /60/ skizziert.

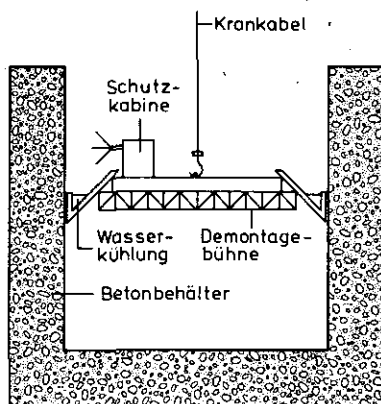


Bild 5.17:

Thermisches Abbruchverfahren mit Demontagebühne, Ringkanal und Abbruchwerkzeugen

Von der Demontagebühne aus wird das thermische Abbruchwerkzeug eingesetzt, wobei die große Staubentwicklung durch das Arbeiten unter Wasser vermieden wird. Anstelle des thermischen Abbruchverfahrens könnten für die skizzierte Abbruchkonstruktion auch mechanische Verfahren eingesetzt werden.

Chemische Verfahren: Hier reagiert eine Säure mit den Bestandteilen des Betons, der dadurch von der Oberfläche her aufgelöst wird. Sulfate dringen in den Zementstein ein und bilden neue schwer lösliche Verbindungen. Die Folge ist, daß neue Kristalle wachsen, die auf ihre Umgebung einen Druck ausüben und das Betongefüge zerstören. Salzsäure ist solch eine Säure, die die kalkhaltigen Bestandteile des Betons auflöst und somit den Betonkörper zerstört /60/ (Bild 5.18).

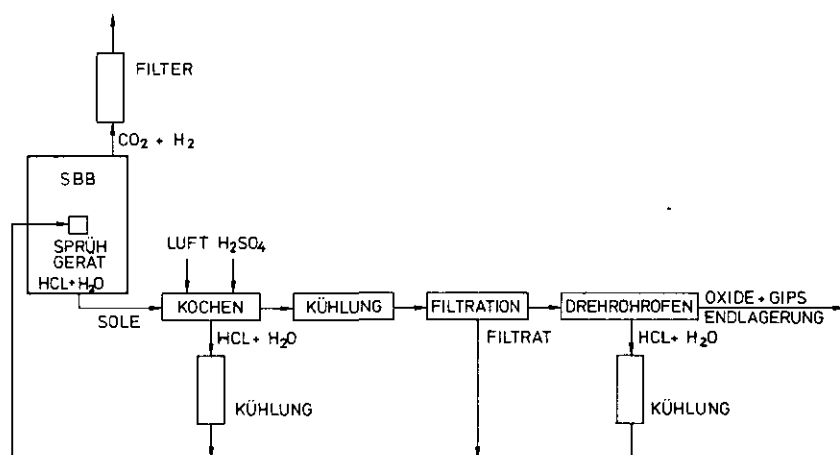


Bild 5.18:

Prozeßablauf des chemischen Abbruchs von SBB mit Salzsäure

Mechanische Verfahren: Die Zerstörung der SBB-Struktur erfolgt durch mechanische Aufhebung der Bindungskräfte des Betons und des Eisens. Eine denkbare Möglichkeit, durch den Liner in den Beton zu bohren, bieten Kernbohrgeräte für Stahlbeton, wie es der Einsatz am Mehrzweck-Forschungsreaktor (MZFR) im Karlsruher Kernforschungszentrum zeigte.

Eine weitere mechanische Abbruchmöglichkeit liegt in der Herstellung von Perforationsbohrungen /60/ (Bild 5.19), die die aktivierte Schicht von der nicht aktivierten Schicht dadurch trennt, daß hinter der aktivierten Schicht eine Bohrlochreihe von oben in die Zylinderwand gebohrt wird und damit einen Zwischenraum schafft.

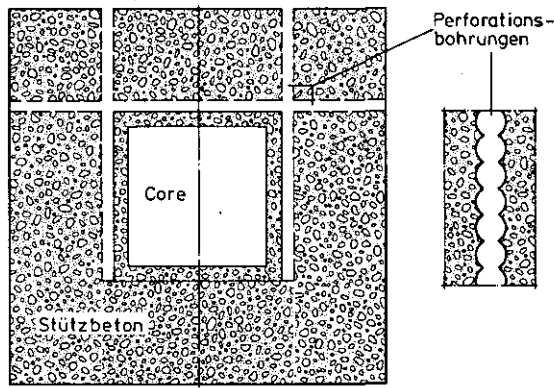


Bild 5.19:

Trennung der nicht-aktivierten Schicht von der aktivierten durch Perforationsbohrungen

Chemisch-mechanische Verfahren: Diese Arten von Verfahren zerstören den Beton auf mechanischem Wege durch Zündung eines chemischen Gemisches, wodurch ein großes Gasvolumen entsteht. Bei hoher Explosionsgeschwindigkeit entsteht dabei eine zertrümmernde und zerschmetternde Wirkung, eine sogenannte Detonation, und bei niedriger Explosionsgeschwindigkeit eine schiebende und aufreißende, auch Deflagration genannt.

Elektromagnetische Verfahren: Bei diesen Verfahren erzeugen elektromagnetische Felder beim Durchströmen von Beton und schlaffer Bewehrung durch Verluste Wärmeenergien. Da die Wärmedehnzahlen von Beton und Stahl unterschiedlich sind, entstehen im Betongefüge Spannungen, die die Betonhülle zerstören.

Die Literatur /60/ kennt hierzu die Verfahren mit fließenden, elektrischen Strömen und elektromagnetischen Feldern. Bei den Verfahren mit fließenden, elektrischen Strömen verwendet man Elektroden, deren Strom bei Anlegung einer Spannung den Beton aufheizt. Dabei sind verschiedene Kombinationsfälle zur Anordnung der Elektroden denkbar (Bild 5.20 bezeichnet sie mit K1, K2, K3). Eine elektrodenlose Zerstörung des Betons wird beim Verfahren mit elektromagnetischen Feldern erreicht. So wird beim Einsatz von Mikrowellen im Betongefüge durch Energiebündelung örtlich ein derartiger Dampfdruck erzeugt, der ein Aufplatzen der Betonschicht zur Folge hat.

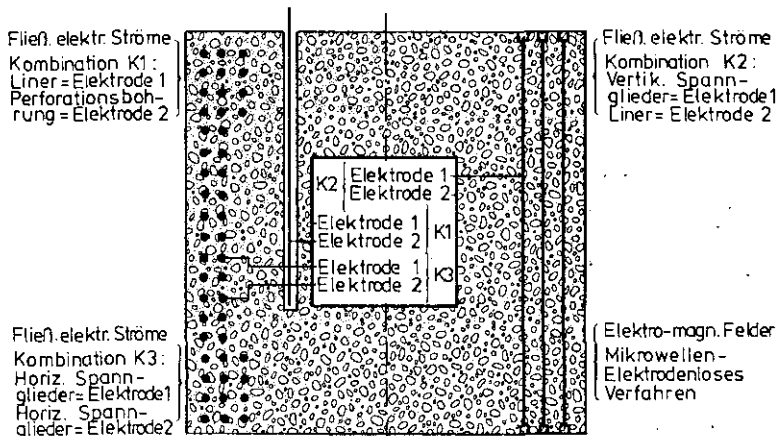


Bild 5.20:

Zerstörung des Betons durch fließende, elektrische Ströme oder durch elektromagnetische Felder

In Bild 5.21 sind die einzelnen Abbruchverfahren an Hand einiger Kriterien vergleichend gegenüber gestellt. Daraus ist zu ersehen, daß es kein ideales Abbruchverfahren gibt. Das optimale hat sich dabei an den speziellen, vorliegenden Verhältnissen zu orientieren, und kann ebensogut eine Kombination verschiedener Abbruchverfahren darstellen.

	SBB-Abbruch-Verfahren	Vorteile	Nachteile
1	Thermische Verfahren - Kernsauerstoffflanze - Pulversauerstoffflanze	- Beton und Stahlbeton werden ohne Schwierigkeiten zerstört - keine Erschütterungen - hohe Arbeitsgeschwindigkeit	- es können teilweise nur Löcher gebohrt werden - Erzeugung von relativ großen Mengen an Gasen und Rauch - Kontaminierung des entstehenden Rauches auch bei Verwendung eines Oberflächenstaubsaugers
2	Chemische Verfahren - Salzsäure	- weitgehender Abbruch ohne Bedienungspersonal - kontrollierbare Entfernung der Betonstruktur	- aufwendige Zusatzeinrichtungen wie Transformatoren - begrenzte Leistungsfähigkeit - evtl. Perforationsbohrungen notwendig
3	Mechanische Verfahren - Kernbohrungen - Diamantkreissägen - Hochdruckwasserstrahl	- keine Entstehung von Gasen - Wasserkühlung minimiert die Entstehung flugfähiger Staubpartikel - Bohrtiefe praktisch nicht begrenzt - Kontrollierte Entfernung der Betonstruktur	- vorhandene Bewehrung verlangsamt die Bohrgeschwindigkeit - Durchbohrung des Liners sehr schwierig - Teilweise Entstehung von Rauch - Kontaminiertes Kühlwasser
4	Chemisch-mechanische Verfahren - Sprengung	- hohe Entfernungsquote - kontrollierte Entfernung der Betonstruktur	- aufwendige Kontrolle des Staubes - Bohren von Sprenglöchern - Erschütterungen
5	Elektromagnetische Verfahren - Elektroden - Mikrowellen	- keine Rauch- und Gasentwicklung	- aufwendige Zusatzeinrichtungen wie Transformatoren - begrenzte Leistungsfähigkeit - evtl. Perforationsbohrungen notwendig

Bild 5.21: Gegenüberstellung möglicher Abbruchverfahren für SBB

6. FERTIGUNGSTECHNISCHE ASPEKTE VON SPANNBETONBEHÄLTERN

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die Arbeitsfolgen für den SBB PR 500 tabellarisch erstellt und im Anschluß daran Konstruktionsmöglichkeiten eines Serien-SBB mit entsprechenden Fertigungsorganisationen vorgestellt.

6.1 Anlagen- und Behälterkonstruktion des Reaktors PR 500

Eine ausführliche Anlagenbeschreibung des Industriekernkraftwerkes PR 500 ist in /42/ nachzulesen. Ebenso ist bei der Konstruktionsbeschreibung des SBB PR 500 auf das Kapitel 4 verwiesen, die dort ausführlich zu finden ist.

6.2 Behältereinzelfertigung des Spannbetonbehälters SBB 189

Für die nachfolgende Größenbezeichnung weiterer SBB wird als Unterscheidung die elektrische Leistung des jeweiligen SBB verwendet, so daß im weiteren für den SBB PR 500 die Bezeichnung SBB 189 geführt wird.

In Bild 6.1 sind die Arbeitsfolgen zur SBB 189 Herstellung dargestellt, wobei mit B die Boden-, mit Z die Zylinder- und mit D die Deckelarbeiten bezeichnet werden.

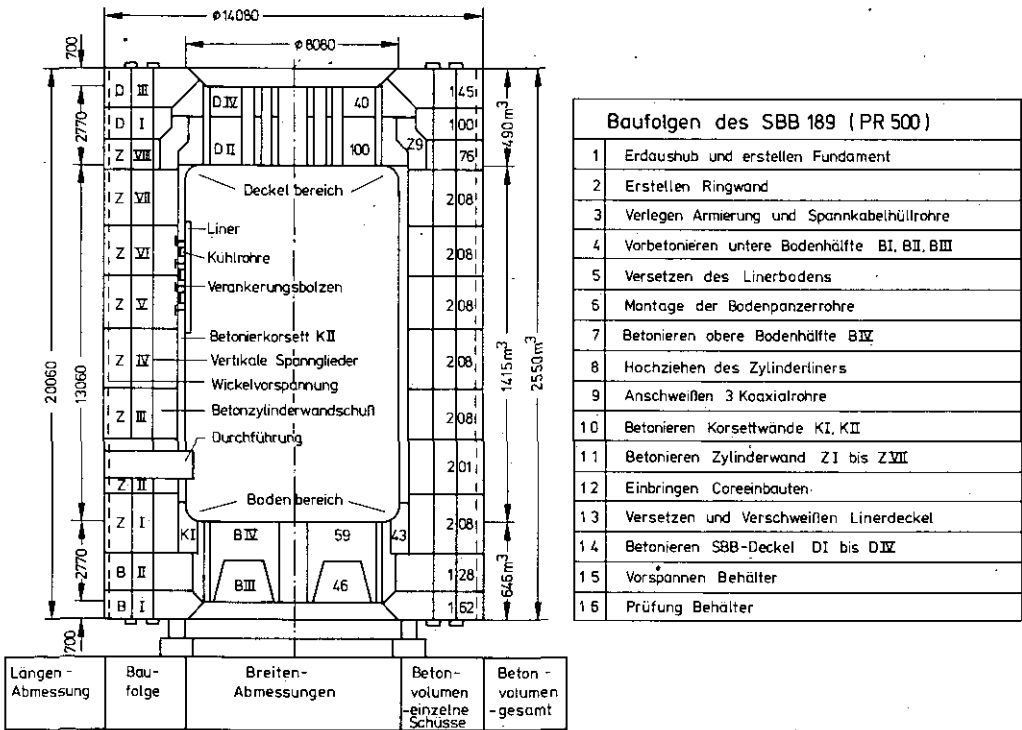


Bild 6.1: Arbeitsfolgen zur Herstellung des SBB 189

6.3 Behälterserienfertigung des Spannbetonbehälters SBB 189

Wurde in Kapitel 6.2 der Bauablauf des SBB 189 in Einzelfertigung gezeigt, so stellt dieses Kapitel Überlegungen an, wie ein Serienprodukt SBB 189 aussehen und der Fertigungsablauf dazu organisiert werden könnte.

6.3.1 Serienbildung an Spannbetonbehältern

Der Übergang der Einzelfertigung zur Serienfertigung wird allgemein durch drei Kriterien gekennzeichnet: Die Ausbildung von Produkttypen, die in Serie gefertigt werden können, extrem arbeitsteilige Organisation der Fertigung, und Konzentration der Fertigung in stationären Fabriken.

Die Ausbildung der Produkttypen "SBB" kann vom Grad der Normung her betrachtet durch Typisierung oder durch Elementierung erfolgen oder vom Gesichtspunkt der Wiederholung entweder aus der Reproduktion eines Grundtypes SBB oder aus der Reproduktion eines Elementes innerhalb des SBB.

Analog dem standardisierten RDB aus Stahl wird hier ein typisierter RDB aus Spannbeton zugrunde gelegt, der einmal aus der bisher bekannten monolithischen Betonstruktur und zum anderen aus elementierten Betonfertigteilen in Form von Schalen und Blöcken besteht und damit dem Kriterium 2 nachkommt.

Die Größe der Serie bildet sich einmal durch die Anzahl der SBB gleicher Leistungseinheit und im zweiten Falle zusätzlich durch die Anzahl gleicher Fertigteilelemente innerhalb des SBB.

Der Anwendungsbereich der Serie soll sich nicht allein auf den SBB 189 beziehen, sondern auch auf solche für KKW größerer Leistung bis 1200 MW_{el} . In Bild 6.2 sind die für die Betrachtung äquivalenten Behälterabmessungen in Abhängigkeit der Leistungsstufung aufgelistet.

Behältertyp	Leistungsstufung (MW_{el})			
	SBB 189	SBB 600	SBB 900	SBB 1200
Innendurchmesser (m)	8,08	10,00	12,00	14,02
Innenhöhe (m)	13,06	13,76	14,46	15,06
Betondicke Zylinder (m)	3,00	3,80	4,60	5,40
Betondicke Boden und Decke (m)	3,50	4,30	5,20	6,00

Bild 6.2:

Behälterabmessungen
verschiedener Leistungsgrößen von
Reaktoren

Für die Behälterstückzahlen innerhalb des gleichen Behältertyps werden die Größen 1, 2, 6, 12 und 30 Stück festgelegt, die im Hinblick auf das Verdopplungsmoment und den prognostizierten Energieverbrauch so gewählt werden.

6.3.2 Entwicklung des Serienproduktes SBB 189

Übernimmt man die Technologie der heutigen SBB-Fertigung für die SBB-Serienfertigung, so stellt der SBB Monolith die erste Variante dazu dar. Wie schon unter 6.3.1 gesagt, wird andererseits eine extrem arbeitsteilige Organisation der Fertigung angestrebt. Dieser Forderung kommt der Behälterbau aus einzelnen Elementen weitgehend nach und stellt die Varianten zwei und drei dar. Für diese Elemente können die Serienbedingungen wie folgt formuliert werden: Das Behälterelement hat nur eine eindeutige Zweckbestimmung zu erfüllen, z.B. "Druckaufnehmen" bei einem Behälterwandelement ohne Durchführungen. Innerhalb eines Behältertyps braucht das Element nur einer Gestaltungsform nachkommen, z. B. "Zylinderwandelement mit Durchführung". Das Element soll nur für einen Behältertyp verwendbar sein. Das Element soll die Variation der Behälterabmessungen ermöglichen.

Bei der Elementfestlegung ist es nun wichtig, viele gleiche Elemente innerhalb eines Behältertyps und wenn möglich auch in verschiedenen SBB zu finden, um damit die Anzahl verschiedener Elemente niedrig zu halten.

Damit tritt bei der Größenfestlegung der Elemente eine Optimierungsaufgabe ein, denn es stehen sich zwei konträre Forderungen gegenüber: Das Element soll so groß wie möglich sein, um die Montage auf der Baustelle zu erleichtern und es soll so klein wie möglich sein, um den Transport zu vereinfachen, die Seriengröße der Elemente zu erhöhen und die Variabilität und Flexibilität der Elemente zu steigern.

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen ergeben sich folgende Konstruktionen für den Serienbehälter SBB 189 einmal in monolithischer, einmal in Fertigteilblockbauweise und einmal in Fertigteilsegmentschalenbauweise (Bild 6.3)

6.3.3 Konstruktionen des Serienbehälters SBB 189

Die Behälterkonstruktion bzw. das statische System des SBB aus monolithischem Beton ist bekannt und bedarf keiner näheren Erläuterung.

Der SBB aus Blockelementen stellt überwiegend eine Fertigteilkonstruktion dar,

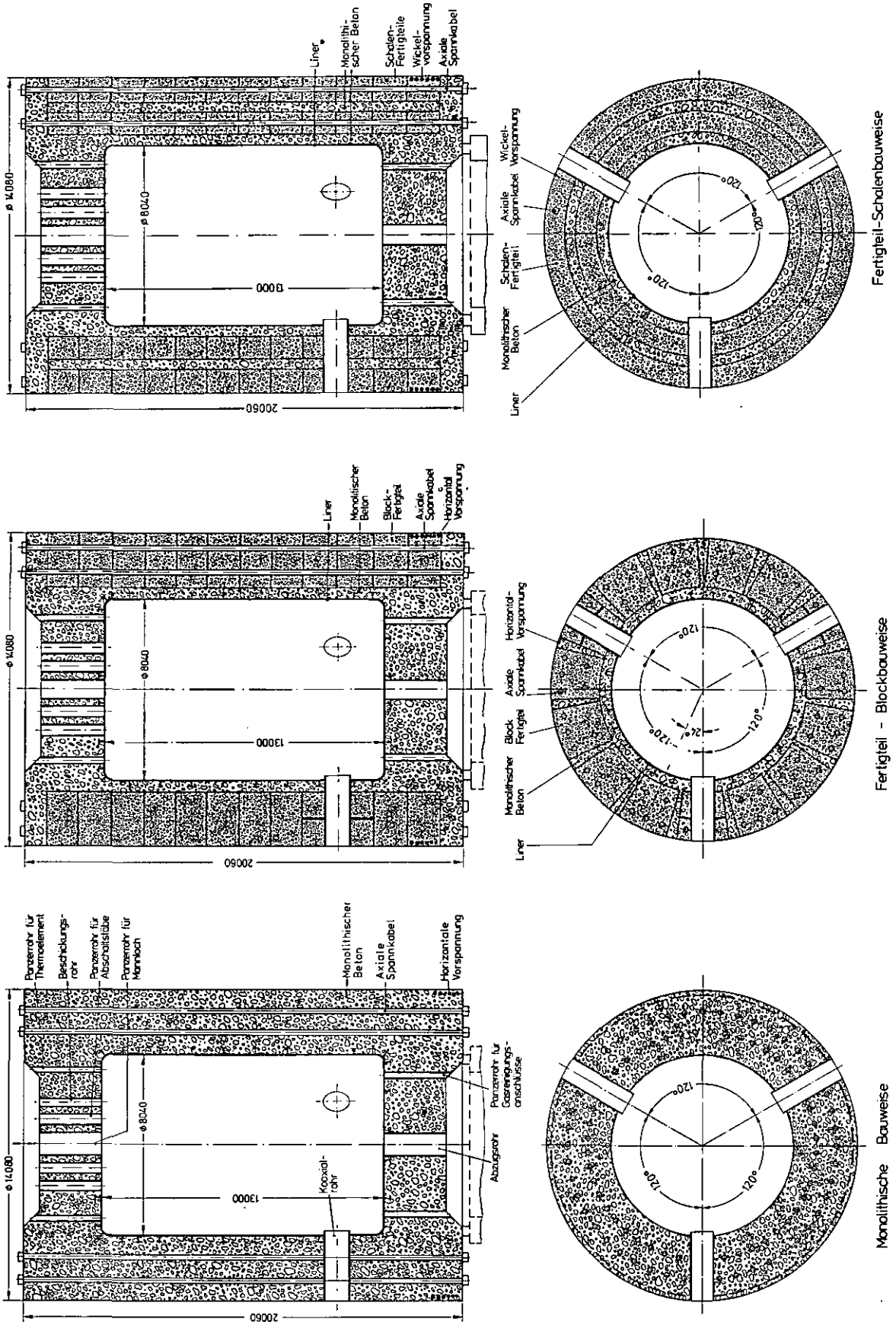


Bild 6.3: Serienbehälter SBB 189 in verschiedenen Konstruktionen

bei der die Zylinderwand vorwiegend aus leicht konisch zum Behältermittelpunkt verlaufenden Betonblockelementen besteht und der Boden wie der Deckel in Ortbeton erstellt sind. Nachdem die Blöcke die Behälterhülle gebildet haben, wird dieser axial und radial vorgespannt.

Der SBB aus Schalenfertigteilen baut sich aus zwei Tragwerksteilen auf: Zylinderschalen, die die Wände bilden, und Ortbeton, der den Deckel und den Boden bildet. Die Behälterwand ist dabei in eine Anzahl konzentrisch angeordneter Ringschalenelemente aufgelöst. Die einzelnen Ringschalenelemente werden am Umfang vorgespannt, wobei die Vorspannung stufenweise aufgebracht wird, wie sie für die Beanspruchung der jeweiligen Schale aus Innendruck und Temperaturgradienten erforderlich ist.

6.3.4 Behälterbauweisen des Serienbehälters SBB 189

Entsprechend der Konstruktion des SBB sind mehrere Behälterbauweisen denkbar, die sich wiederum am verwendeten Vorspannsystem orientieren (Bild 6.4).

BEHÄLTERBAUWEISEN FÜR DIE SERIENFERTIGUNG VON SBB				
MONOLITHISCHE BAUWEISE		FT-BLOCKBAUWEISE		FT-SCHALENBAUWEISE
Vorspannung mit:				
<u>Radial-Spannverfahren</u>	<u>Wickel-Spannverfahren</u>	<u>Aufweitung mit Pressen</u>	<u>Wickel-Spannverfahren</u>	<u>Wickel-Spannverfahren</u>
1. Herstellung der Basis	1. Herstellung der Basis	1. Herstellung der Basis	1. Herstellung der Basis	1. Herstellung der Basis
2. Betonieren des Außenringes	2. Betonieren der Zylinderwände	2. Auflegen der FT-Blöcke	2. Auflegen der FT-Blöcke	2. Aufbau des inneren Zylinders
3. Einbringen des Ringspannblinds und Vorspannen	3. Liner-Ausbau	3. Umwickeln mit Spannstahl	3. Betonieren der Hohlräume	3. Vorspannen durch Wickeln
4. Betonieren des Innenringes	4. Betonieren des Deckels und der Randbereiche	4. Aufweiten mit Pressen und Verfüllen der Hohlräume	4. Wiederholung von 2. und 3.	4. Wiederholung von 2. und 3.
5. Liner-Einbau	5. Vorspannung mit der Wickelmaschine	5. Wiederholung der Punkte 2., 3., u. 4.	5. Liner-Einbau	5. Injizieren der Zwischenräume
6. Betonieren des Deckels und der Randbereiche	6. Vertikale Vorspannung	6. Liner-Einbau	6. Betonieren des Deckels und der Randbereiche	6. Liner-Einbau
7. Vertikale Vorspannung	7. Injizieren des Spaltes zwischen Liner und SBB	7. Betonieren des Deckels und der Randbereiche	7. Vertikale Vorspannung	7. Betonieren des Deckels und der Randbereiche
8. Injizieren des Spaltes zwischen Liner und SBB	8. Torkretschicht auf den Spannstahl	8. Vertikale Vorspannung	8. Injizieren des Spaltes zwischen Liner und SBB	8. Vertikale Vorspannung
		9. Injizieren des Spaltes zwischen Liner und SBB	9. Torkretschicht auf den Spannstahl	9. Injizieren des Spaltes zwischen Liner und SBB
				10. Torkretschicht auf den Spannstahl

Bild 6.4: Bauweisen für den Serienbehälter SBB 189

Untersucht /71/ werden bei der monolithischen Bauweise die Vorspannung durch das Radial- und das Wickelspannverfahren, bei der Fertigteil (FT)-Blockbauweise das Aufweiten mit Pressen und das Wickelspannverfahren und bei der Fertigteil (FT)-Segmentschalenbauweise alleine das Vorspannen durch Wickeln.

6.3.4.1 Monolithische Bauweise mit Vorspannung durch das Radialspannverfahren

Die Bodenplatte wird in einem ersten Bauvorgang betoniert und kann entweder gleich nach der Erhärtung oder zu einem späteren Zeitpunkt vorgespannt werden. Die Zylinderwand wird wegen des Radialspannverfahrens in zwei Teilen hergestellt, wobei der äußere Wandteil folgende Dicke d_a erhält:

$$d_a = d - 0,70 - 0,30 = d - 1,0 \text{ (m)}$$

d_a = Dicke des äußeren Ringes

d = gesamte Zylinderwandstärke

0,70 = Innenwandanteil zur Aufnahme der Ringspannbündel

0,30 = Injektionsbeton zwischen SBB und Liner

Nach Erhärtung der Bodenplatte erfolgt das Bewehren und Betonieren des äußeren Ringes abschnittsweise oder im Gleitverfahren. Daran schließt sich der Einbau der Ringspannelemente mit nachfolgender Vorspannung mittels Radialspannstäbe an. Erst nach dem Spannen aller Ringspannelemente wird der Innenwandanteil in Abschnitten betoniert. In bekannter Weise erfolgt der Linereinbau, das Deckel- und Randbereichbetonieren, das vertikale Vorspannen und das Injizieren des Spaltes zwischen Liner und SBB.

6.3.4.2 Monolithische Bauweise mit Vorspannung durch das Wickelspannverfahren

Nach der Herstellung der Bodenplatte wird die Zylinderwand in vollem Querschnitt bis zur Unterkante Decke betoniert und danach der Liner eingebaut. Die Fertigstellung der restlichen Zylinderwand und die des Deckels schließen sich an. Die Wickelvorspannung wird mehrlagenweise auf den Mantel des SBB mittels einer Wickelmaschine aufgebracht, deren Größe durch den zu wickelnden Spannstahl mit zugehöriger Zugkraft bedingt ist. Vertikales Vorspannen und Spaltinjizierung zwischen SBB und Liner folgen. Zum Schutz der Vorspannung gegen Korrosion wird eine ca. 10 cm dicke, mit schlaffer Bewehrung versehene Torkretschicht aufgebracht.

6.3.4.3 FT-Blockbauweise mit Vorspannung durch Aufweitung

Die Blockfertigteile werden in stationären Fertigteilwerken oder auf der Baustelle hergestellt. Die Blöcke werden jeweils in einer Lage auf die Basis (=Bodenplatte und anteilige Wandteile) aufgelegt und auf der Außenseite mit Spannstahl in mehreren Lagen umwickelt. Bei den vorliegenden Verhältnissen kommen für das Aufweiten hydraulische Pressen mit einem Hubweg von 4 bis 7 cm

und einer Pressenkraft von 2500 Mp zum Einsatz. Nach der Aufweitung des Ringes ist der zwischen den FT-Blöcken vorhandene Zwischenraum mit Beton auszufüllen. Die Vorspannkkräfte sind dabei rd. 48 Stunden konstant zu halten.

Nach Fertigstellung einer Ringlage wiederholt sich der Vorgang für die darauffolgenden Lagen bis zum Erreichen der Decke. Es erfolgt anschließend der Einbau des Liners, der grundsätzlich auch parallel zu den Betonierabschnitten vorgenommen werden kann. Aufgrund der Nachteile eines vorherigen Linereinbaues wie Installation eines aufwendigen Aussteifungsgerüsts beim Betonieren und Arbeitsbühne beim Anfertigen und Prüfen der Schweißnähte wird für alle nachfolgenden Betrachtungen ein nachträglicher Linereinbau vorgesehen.

Nach dem Linereinbau erfolgt die Deckelbetonierung, die vertikale Vorspannung und das Verfüllen des Spaltes zwischen Liner und SBB.

6.3.4.4 FT-Blockbauweise mit Vorspannung durch Bewickeln

Bei dieser Bauweise werden die Betonblöcke in ihrer endgültigen Lage für die Zylinderwand positioniert, nachdem die Basis erstellt und die dazwischenliegenden Hohlräume mit Beton ausgegossen wurden. Diese Vorgänge wiederholen sich ebenso wie bei vorheriger Bauweise bis zum Erreichen der Decke, jedoch mit dem Unterschied, daß der Stützbeton noch nicht vorgespannt ist. Nach dem Linereinbau und dem Deckelbetonieren wird das Behältervorspannen in axialer Richtung eingeleitet, dem sich die Wickelvorspannung mittels einer vorzuhaltenden Wickelmaschine anschließt. Die Größe der Wickelmaschine ist durch den zu wickelnden Spannstahl mit zugehöriger Zugkraft bedingt. Für die Werte der statischen Berechnung wurde verwendet:

$$\begin{aligned} &\text{Litze } \emptyset 0,6'' , \text{ St 160/180 mit } \sigma_{zu1} = 0,7 \cdot \beta_z = 126 \text{ kp/mm}^2 \\ &\text{bzw. } 0,95 \cdot \sigma_s = 152 \text{ kp/mm}^2, P_{zu1} = 17,64 \text{ Mp bzw. } 21,28 \text{ Mp} \end{aligned}$$

6.3.4.5 FT-Schalenbauweise mit Vorspannung durch Bewickeln

Der Aufbau der Segmentschalenfertigteile wird ebenso wie bei der Blockbauweise von einer vorher erstellten Basis durchgeführt. Um nach dem Prinzip der auf dem Baumarkt vorhandenen Wickelmaschinen zu arbeiten, werden die Schalen als konzentrische Ringe in der Vertikalen bis zur Decke aufgebaut. Begonnen wird mit dem Aufbau des inneren Zylinders, daran schließt sich die Wickelvorspannung an. Um den ersten Ring mit aufgewickeltem Spannstahl wird ein zweiter aus Schalenfertigteilen gebaut und mit der Wickelmaschine vorgespannt. Dieser Vorgang wiederholt sich bis zur Fertigstellung über den ganzen Durchmesser des SBB. Ein Verfüllen der Hohlräume zwischen den einzelnen, bewickelten Rin-

gen kann gleich nach der Vorspannung oder später durchgeführt werden. Es erfolgt in bereits geschildeter Weise der Linereinbau mit der Herstellung der kraftschlüssigen Verbindung zwischen Liner und Betonstützkörper, nachdem der Deckel und die zugehörigen Randbereiche in Ortbeton ausgeführt wurden.

6.3.5 Dimensionierung der Serienbehälter und -elemente

Für die drei vorab erläuterten SBB-Bauweisen - monolithische, FT-Block- und FT-Schalenbauweise - werden nachfolgend die Abmessungen und Mengen der Behälter bzw. -elemente ermittelt, um im Kapitel 6.3.6 die Seriengröße festlegen zu können.

6.3.5.1 Dimensionierung bei der monolithischen Bauweise

Eine detaillierte Dimensionierung, wie es bei den beiden nachfolgenden Behälterbauweisen in FT-Konstruktion erforderlich ist, ist hier nicht notwendig, da sich der Behälter nicht aus einzelnen Elementen zusammensetzt. Die Mengen und Gewichte hierfür sind aus Bild 6.5 zu entnehmen.

Behälterbauweise	Monolithische Bauweise Wickel-Spannverfahren				Monolithische Bauweise Radial-Spannverfahren			
	189	600	900	1 200	189	600	900	1 200
Beton								
Ortbeton (m ³)	2 454	4 413	7 137	10 763	2 454	4 413	7 137	10 763
Torkretbeton (m ³)	90	124	166	211				
Liner-Verguß (m ³)	65	84	108	131	65	84	108	131
Schalung								
- Sohle (m ²)	208	323	467	638	208	323	467	638
- 2 x innen (m ²)	728	933	1 162	1 400	728	933	1 162	1 400
- außen (m ²)	887	1 236	1 655	2 109	887	1 236	1 655	2 109
- Deckel (m ²)	51	79	113	154	51	79	113	154
Gerüste (pausch.)	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Bewehrung								
Schlauffstahl (t)	186	378	555	863	186	378	555	863
Spannst. -vert. (t)	56,4	95	153	228	56,4	95	153	228
-rad. (t)					90,2	155	242	363
Litze -ringen (t)					88,6	147	229	333,3
-wickeln (t)	145,2	247	389	569				
Hilfsstahl (geschmiedete Platten)					ja	ja	ja	ja
Gerät (pauschal)	ja	ja	ja	ja				
Liner								
Coreliner (t)	79	105	137	179	79	105	137	179

Bild 6.5: Mengen und Gewichte bei verschiedenen SBB-Größen in nichtintegrierter, monolithischer Bauweise mit dem Wickel- und dem Radialspannverfahren

6.3.5.2 Dimensionierung bei der FT-Blockbauweise

In Anlehnung an den Modellbehälter nach /12/ und unter Berücksichtigung der Elementabmessungen für Transport und Montage ergeben sich für den SBB 189 die in Bild 6.6 dargestellten Blockfertigteile.

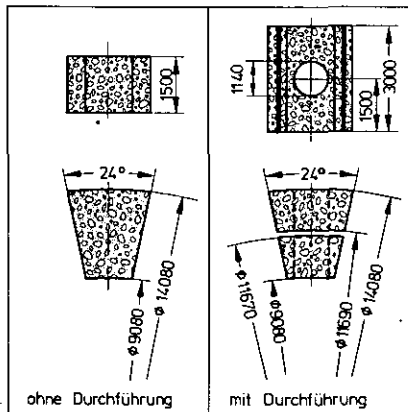


Bild 6.6:
Geometrie und
Abmessungen der
Blockfertigteile
für den SBB 189

Die daraus resultierenden Mengen und Gewichte für den SBB 189 in FT-Blockbauweise beim Aufweit- und Wickelspannverfahren sowie bei verschiedenen Behältergrößen sind aus Bild 6.4 ersichtlich

Behälter- bauweise	FT-Blockbauweise Aufweit-Spannverfahren				FT-Blockbauweise Wickel-Spannverfahren				
	SBB	189	600	900	1 200	189	600	900	1 200
Beton									
Ortbeton (m ³)	1 004	2 038	3 000	4 661	1 004	2 038	3 000	4 661	
Zwickelverguß und Torkretbeton (m ³)					90	124	166	211	
FT -gekrümmt (m ³) -gerade (m ³)	1 450	2 375	4 137	6 102	1 450	2 375	4 137	6 102	
Liner-Verguß (m ³)	65	84	108	131	65	84	108	131	
Schalung									
- Sohle (m ²)	157	165	174	181	157	165	174	181	
- innen (m ²)									
- außen (m ²)	310	476	693	935	310	476	693	935	
- Deckel (m ²)	312	488	706	968	312	488	706	968	
Gerüste	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Bewehrung									
Schlaffstahl (t)	186	378	555	863	168	378	555	863	
Spannst. -vert.(t)	56,4	95	153	228	56,4	95	153	228	
Litze -wickeln (t) -aufweit.(t)	145,2	247	388	569	145,2	247	389	569	
Hilfsstahl (Flach- stahl) (t)	221	334	537	785					
Gerät (Pressen)	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Liner									
Coreliner (t)	79	105	137	179	79	105	137	179	

Bild 6.7: Mengen und Gewichte bei verschiedenen SBB-Größen in nichtintegrierter, FT-Blockbauweise mit dem Aufweit- und dem Wickelspannverfahren

In welcher Art die Mengen und Gewichte der Block-FT beim SBB 189 ermittelt werden, geht aus den Bildern 6.8, 6.9, und 6.10 hervor.

Zylinder- schuß	Anzahl gleich. Block-Segmente	Abmessungen der Segmente H (mm) B (mm) D (mm)	Gewicht (t) pro Segment	Durch- führung	Art der Durchführung	Durchmesser (mm) der Durchführung	Höhenlage (mm) der Durchführung
1	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
2	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
3	12	1500 x 2150 x 2500	20.1				
	3 ⁺	3000 x 2300 x 1200	17.7	1	Koaxialrohr	1140	5470
	3 ⁺	3000 x 2000 x 1300	18.1	1	Koaxialrohr	1140	5470
4	12	1500 x 2150 x 2500	20.1				
	+	die zweite Hälfte					
5	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
6	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
7	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
8	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
9	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
10	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
11	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
12	15	1500 x 2150 x 2500	20.1				
Boden	Monolith	3500 x 9080 ^ø x 14080 ^ø		1	Abzugsrohr	1000	
				2	Gasrein.- Anschl.	200	
Deckel	Monolith	3500 x 9080 ^ø x 14080 ^ø		18	Abschalt- posit.	370	
				1	Mannloch	910	
				6	Beschick.- Rohre	85	
				2	Thermoel.- Durchf.	200	

Bild 6.8: Zylinderschußaufteilung mit Block-FT beim SBB 189

Blockfertigteile	Fertigteile pro Schuß / Teilung	Anzahl der Schüsse pro Behälter	Abmessungen der Blockelemente (mm)				Gewicht eines Block- fertigteiles (t)
			Höhe	Ø Breite	Dicke	Breiten B1 u. B2	
SBB 189	15 / 24 ⁰	12	1500 3000	2150 2300/2100	2500 1200/1300	1800 x 2500	20.1 18.1 / 17.7
SBB 600	18 / 20 ⁰	13	1500 3000	2050 1900/2200	3300 1600/1700	1800 x 2300	25.3 21.0 / 20.4
SBB 900	24 / 15 ⁰	15	1500 3000	1950 1800/2100	4100 2000/2100	1700 x 2200	29.9 25.0 / 23.4
SBB 1200	30 / 12 ⁰	16	1500 3000	1850 1800/2200	4900 2400/2500	1600 x 2100	33.9 28.0 / 26.1

Bild 6.9: Zylinderschußaufteilung mit Block-FT bei verschiedenen SBB

Block- fertigteile Behälter	Gleiche Blockfertigteile			Ähnliche Blockfertigteile			Sonderformen		
	Anzahl	Gew. to	Abmess.in mm	Anzahl	Gew. to	Abmess.in mm	Anzahl	Gew. to	Abmess. in mm
SBB 189	174	20.1	1500x2100x2500	3	17.7	3000x2100x1300	1	Monolith	Boden 3500x14080 ø
				3	18.1	3000x2300x1200	1	Monolith	Deckel 3500x14080 ø
SBB 600	228	25.3	1500x2050x3300	3	21.0	3000x1900x1700	1	Monolith	Boden 4300x17600 ø
				3	20.4	3000x2200x1600	1	Monolith	Deckel 4300x17600 ø
SBB 900	354	29.9	1500x1950x4100	3	25.0	3000x1800x2000	1	Monolith	Boden 5200x21200 ø
				3	23.4	3000x2000x2100	1	Monolith	Deckel 5200x21200 ø
SBB 1200	474	33.9	1500x1850x4900	3	28.0	3000x1800x2400	1	Monolith	Boden 6000x24820 ø
				3	26.1	3000x2200x2500	1	Monolith	Deckel 6000x24820 ø

Bild 6.10: Klassifizierung der Block-FT bei verschiedenen SBB

6.3.5.3 Dimensionierung bei der FT-Segmentschalenbauweise

In Anlehnung an den Modellbehälter nach /54/ ergeben sich wiederum unter Berücksichtigung der Transport- und Montageverhältnisse für die Schalenfertigteile des SBB 189 die in Bild 6.11 dargestellten Abmessungen :

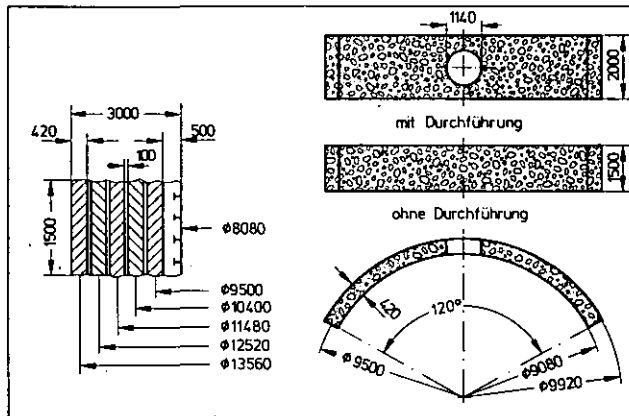


Bild 6.11:
Geometrie und
Abmessungen der
Schalen-FT
für den SBB 189

Daraus werden wiederum die Mengen und Gewichte für den SBB 189 und für die anderen Behältergrößen beim Wickelspannverfahren ermittelt (Bild 6.12).

Behälter- bauweise	FT-Segmentbauweise Wickel-Spannverfahren			
	189	600	900	1 200
Beton				
Ortbeton (m ³)	914	1 433	2 418	4 548
Fugenverguß (m ³)	300	575	943	1 263
FT-gekrümmt (m ³)	1 240	2 405	3 776	4 950
- gerade (m ³)				
Liner-Verguß (m ³)	65	84	108	131
Schalung				
- Sohle (m ²)	157	165	174	181
- innen (m ²)				
- außen (m ²)	310	476	693	935
- Deckel (m ²)	312	488	706	968
Gerüste (pausch.)	ja	ja	ja	ja
Bewehrung				
Schlaffstahl (t)	186	378	555	863
Spannst. vert.(t)	56,4	95	153	228
Litze-wickeln	124	210	331	484
Hilfsstahl				
Gerät (pausch.)	ja	ja	ja	ja
Liner				
Coreliner (t)	79	105	137	179

Bild 6.12: Mengen und Gewichte bei verschiedenen SBB-Größen in nicht-integrierter, FT-Schalenbauweise mit dem Wickelspannverfahren

Wie diese Mengen und Gewichte beim SBB 189 und bei den anderen Behältergrößen in FT-Segmentschalenbauweise zustande kommen, zeigen nachfolgende Bilder 6.13, 6.14 und 6.15, wobei Bild 6.13 eine allgemeine Zylinderschußaufteilung beim SBB 189 in Schalen-FT vornimmt, Bild 6.14 dies zusätzlich bei den anderen Behältergrößen durchführt und Bild 6.15 eine Klassifizierung der unterschiedlichen Schalen-FT für alle Behältergrößen zeigt.

Zylinder-schuß	Anzahl gleich. Schalensegm.	Abmessungen der Segmente H(mm) B(mm) $\phi_{\text{mittel}} \times \alpha^{\circ}$	Gewicht (t) pro Segment	Durch-führung	Art der Durchführung	Durchmesser (mm) der Durchführung	Höhenlage (mm) der Durchführung
1	3	1500x420 x 9500x120 ⁰	15.6				
	3	1500x420 x 10440x120 ⁰	17.2				
	3	1500x420 x 11480x120 ⁰	18.9				
	3	1500x420 x 12520x120 ⁰	20.6				
	3	1500x420 x 13560x120 ⁰	22.3				
2	3	1500x420 x 9500x120 ⁰	15.6				
	3	1500x420 x 10440x120 ⁰	17.2				
	3	1500x420 x 11480x120 ⁰	18.9				
	3	1500x420 x 12520x120 ⁰	20.6				
	3	1500x420 x 13560x120 ⁰	22.3				
3	3	2000x420 x 9500x120 ⁰	19.7	1	Koaxialrohr	1140	5470
	3	2000x420 x 10440x120 ⁰	21.7	1	Koaxialrohr	1140	5470
	3	2000x420 x 11480x120 ⁰	24.0	1	Koaxialrohr	1140	5470
	3	2000x420 x 12520x120 ⁰	26.3	1	Koaxialrohr	1140	5470
	3	2000x420 x 13560x120 ⁰	28.6	1	Koaxialrohr	1140	5470
11	3	1500x420 x 9500x120 ⁰	15.6				
	3	1500x420 x 10440x120 ⁰	17.2				
	3	1500x420 x 11480x120 ⁰	18.9				
	3	1500x420 x 12520x120 ⁰	20.6				
	3	1500x420 x 13560x120 ⁰	22.3				
Boden	Monolith	3500x9080 ⁰ x 14080 ⁰		1	Abzugsrohr	1000	
				2	Gasrein.-Anschluß	200	
Deckel	Monolith	3500x9080 ⁰ x 14080 ⁰		18	Abschalt-position	370	
				1	Mannloch	910	
				6	Beschick.-Rohre	85	
				2	Thermoelem.-Durchführ.	200	

Bild 6.13: Zylinderschußaufteilung mit Schalen-FT beim SBB 189

Behältertyp	Schalenfertigteile		
	Anzahl Segmente pro Ringschalenelement	Anzahl Ringschalen-elemente pro Zyl.Schuß	Anzahl Schüsse pro Behälter
SBB 189	3	5	11
SBB 600	4	6	13
SBB 900	5	7	14
SBB 1200	6	8	16

Bild 6.14: Zylinderschußaufteilung mit Schalen-FT bei verschiedenen SBB

Schalen-Fertigteile	gleiche Schalenfertigteile			ähnliche Schalenfertigteile			Sonderformen		
Behältertyp	Anzahl	Gew (to)	Abmessungen mm	Anzahl	Gew (to)	Abmessungen mm	Anzahl	Gew (to)	Abmessungen mm
SBB 189	30	15,6	1500 x 420 x 9500 x 120°	3	19,7	2000 x 420 x 9500 x 120°	1	Monolith	Boden 3500 x 14080 Ø
	30	17,3	1500 x 420 x 10440 x 120°	3	21,7	2000 x 420 x 10440 x 120°	1	Monolith	Deckel 3500 x 14080 Ø
	30	18,9	1500 x 420 x 11480 x 120°	3	24,0	2000 x 420 x 11480 x 120°			
	30	20,6	1500 x 420 x 12520 x 120°	3	26,3	2000 x 420 x 12520 x 120°			
	30	22,3	1500 x 420 x 13560 x 120°	3	28,6	2000 x 420 x 13560 x 120°			
SBB 600	48	15,5	1500 x 460 x 11460 x 90°	4	19,5	2000 x 460 x 11460 x 90°	1	Monolith	Boden 4300 x 17600 Ø
	48	16,9	1500 x 460 x 12490 x 90°	4	21,3	2000 x 460 x 12490 x 90°	1	Monolith	Deckel 4300 x 17600 Ø
	48	18,5	1500 x 460 x 13630 x 90°	4	23,4	2000 x 460 x 13630 x 90°			
	48	20,0	1500 x 460 x 14770 x 90°	4	25,4	2000 x 460 x 14770 x 90°			
	48	21,6	1500 x 460 x 15910 x 90°	4	27,5	2000 x 460 x 15910 x 90°			
	48	23,0	1500 x 460 x 17050 x 90°	4	29,5	2000 x 460 x 17050 x 90°			
SBB 900	65	15,2	1500 x 480 x 13840 x 72°	5	19,0	2000 x 480 x 13840 x 72°	1	Monolith	Boden 5200 x 21200 Ø
	65	16,4	1500 x 480 x 14560 x 72°	5	20,6	2000 x 480 x 14560 x 72°	1	Monolith	Deckel 5200 x 21200 Ø
	65	17,8	1500 x 480 x 15760 x 72°	5	22,4	2000 x 480 x 15760 x 72°			
	65	19,1	1500 x 480 x 16960 x 72°	5	24,3	2000 x 480 x 16960 x 72°			
	65	20,5	1500 x 480 x 18160 x 72°	5	26,0	2000 x 480 x 18160 x 72°			
	65	21,9	1500 x 480 x 19360 x 72°	5	27,9	2000 x 480 x 19360 x 72°			
	65	23,2	1500 x 480 x 20560 x 72°	5	29,6	2000 x 480 x 20560 x 72°			
SBB 1200	90	15,2	1500 x 500 x 15520 x 60°	6	18,9	2000 x 500 x 15520 x 60°	1	Monolith	Boden 6000 x 24820 Ø
	90	16,3	1500 x 500 x 16650 x 60°	6	20,3	2000 x 500 x 16650 x 60°	1	Monolith	Deckel 6000 x 24820 Ø
	90	17,6	1500 x 500 x 17910 x 60°	6	22,0	2000 x 500 x 17910 x 60°			
	90	18,8	1500 x 500 x 19170 x 60°	6	23,7	2000 x 500 x 19170 x 60°			
	90	20,1	1500 x 500 x 20430 x 60°	6	25,3	2000 x 500 x 20430 x 60°			
	90	21,3	1500 x 500 x 21690 x 60°	6	27,0	2000 x 500 x 21690 x 60°			
	90	22,5	1500 x 500 x 22950 x 60°	6	28,6	2000 x 500 x 22950 x 60°			
	90	23,7	1500 x 500 x 24210 x 60°	6	29,9	2000 x 500 x 24210 x 60°			

Bild 6.15: Klassifizierung der Schalen-FT bei verschiedenen SBB

6.3.6 Ermittlung der Seriengröße an SBB

Um die Seriengröße an SBB oder SBB-Elementen innerhalb eines Behälters ermitteln zu können, wurde bereits in den Bildern 6.10 und 6.15 eine Ordnung der Schalen- bzw. Block-FT in gleiche, ähnliche und Sonderformen eingeführt, woraus jetzt bei unterschiedlicher Behälterstückzahl für die verschiedenen Behältergrößen die Anzahl der Fertigteile errechnet wird, was zur Seriengröße an SBB bzw. SBB-Elementen führt (Bild 6.16).

Anzumerken ist hierbei, daß sich die Seriengröße der monolithisch erstellten SBB (Spalte 3 in Bild 6.16) äquivalent der Behälterstückzahl ergibt, da keine Aufteilung des SBB in Einzelelemente vorliegt.

Bei den Segmentschalen-FT bedeutet die Schreibweise 5x30 oder 5x3, daß fünf Schalen dieser Segmente einen Behälterschuß ergeben, und daß 30 bzw. 3 Schalen

über den ganzen SBB gleiche Geometrie und Abmessungen besitzen.

Die Sonderformen resultieren aus der Boden- und Deckengestaltung des SBB, die in allen Fällen monolithisch erstellt werden.

Behälter- typ	Behälter- stückzahl	Anzahl der kompletten mono- lithischen Beh.	Anzahl der Blockfertigteile			Anzahl d. Segmentschalenfertigteile		
			gleiche Blockfert.	ähnliche Blockfert.	Sonder- formen	gleiche Schalenfert.	ähnliche Schalenfert.	Sonder- formen
SBB 189	1	1	174	3/3	2	5x30	5x3	2
	2	2	348	6/6	4	5x60	5x6	4
	6	6	1044	18/18	12	5x180	5x18	12
	12	12	2088	36/36	24	5x360	5x36	24
	30	30	5220	90/90	60	5x900	5x90	60
SBB 600	1	1	228	3/3	2	6x48	6x4	2
	2	2	456	6/6	4	6x96	6x8	4
	6	6	1368	18/18	12	6x288	6x24	12
	12	12	2736	36/36	24	6x576	6x48	24
	30	30	6840	90/90	60	6x1440	6x120	60
SBB 900	1	1	354	3/3	2	7x65	7x5	2
	2	2	708	6/6	4	7x130	7x10	4
	6	6	2124	18/18	12	7x390	7x30	12
	12	12	4248	36/36	24	7x780	7x60	24
	30	30	10620	90/90	60	7x1950	7x150	60
SBB 1200	1	1	474	3/3	2	8x90	8x6	2
	2	2	948	6/6	4	8x180	8x12	4
	6	6	2844	18/18	12	8x540	8x36	12
	12	12	5688	36/36	24	8x1080	8x72	24
	30	30	14220	90/90	60	8x2700	8x180	60

Bild 6.16: Seriengröße an SBB-Fertigteilen bei unterschiedlicher SBB-Anzahl und SBB-Größe

6.3.7 Organisation des Fertigungsablaufes der SBB

Um auf die denkbaren Organisationstypen der Behälterfertigung aus Spannbeton in Serie zu kommen, wird vorweg eine Erläuterung verwendeter Begriffe gegeben.

6.3.7.1 Begriffserläuterungen

Fertigungsart: Mellerowicz /72/ versteht darunter den Leistungsumfang einer Fertigung, der wie folgt aussehen kann:

- Einzelfertigung mit Leistungswiederholung 1..... 5
- Kleinserienfertigung mit Leistungswiederholung 5..... 100
- Mittel- und Großserienfertigung mit Leistungsw. 100...10 000
- Massenfertigung mit Leistungswiederholung >10 000

- Die Einzelfertigung definiert Gutenberg /73/ dadurch, daß bei ihr ein Erzeugnis nur ein einziges Mal in der Regel hergestellt wird und zwar auf Bestellung.
- Die Serienfertigung ist eine Fertigungsart im Mehrproduktbetrieb, bei der neben oder nacheinander mehrere verschiedenartige, aber hinsichtlich der Bearbeitungsmethoden ähnliche Produkte hergestellt werden.
- Die Massenfertigung ist ebenfalls eine Fertigungsart im Mehrproduktbetrieb, die sich von der Serienfertigung durch eine größere Leistungswiederholung mit geringerer Produktzahl unterscheidet.

Fertigungsform: Jacob /74/ definiert sie wie folgt: "Fertigungsformen repräsentieren spezifische Lösungsmöglichkeiten der raum-zeitlichen Gestaltung fertigungswirtschaftlicher Aktionsgefüge". Die Fertigungsformbildung läßt sich hauptsächlich nach dem Baustellen-, Werkstätten- und dem Flußprinzip bewirken.

- Die Baustellenfertigung entsteht dadurch, daß der Arbeitsgegenstand ortsgebunden ist und eine punktuelle Bearbeitung am Produkt vorgenommen wird. Dadurch müssen das Arbeitspersonal und die Betriebsmittel sowie Roh-, Hilfs- und Werkstoffe zum Arbeitsplatz gebracht werden.
- Bei der Werkstättenfertigung findet eine räumliche Zusammenfassung artgleicher Arbeitsplätze und Betriebsmittel statt, wodurch Gruppen von Arbeitssystemen mit gleichem Verrichtungszweck entstehen.
- Das Flußprinzip stellt eine erzeugnisorientierte Ordnung der Arbeitsplätze dar, entsprechend zum Ablauf bestimmter Arbeitsgegenstände /75/.

Zur Einengung der möglichen Fertigungsformen für industriell gefertigte Produkte, gibt Dolezalek /76/ im Bild 6.17 einen Zusammenhang zwischen Fertigungsformen und Fertigungsarten an.

FERTIGUNGSFORMEN					
Fließfertigung			<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Gruppenfertigung			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werkstattfertigung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Punktfertigung	Baustellenfertigung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	automatisches Fertigungszentrum		<input type="checkbox"/>		
	handwerkliche Fertigung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		FERTIGUNGSARTEN			
		Einzel-fertigung	Klein-serien-fertigung	Mittel-serien-fertigung	Groß-serien-fertigung
					Massen-fertigung

Bild 6.17:
Zusammenhang zwischen Fertigungsformen und Fertigungsarten

Daraus läßt sich bei der Einzelfertigung die Entscheidung für die Werkstättenfertigung und Baustellenfertigung finden, und für die Massenfertigung ist alleine die Fließfertigung die geeignete Fertigungsform. Bei der Serienfertigung kann den Umständen entsprechend die Fließfertigung, die Werkstättenfertigung oder die Baustellenfertigung zum Einsatz kommen.

Auf den Bausektor allgemein und auf die SBB-Fertigung speziell bezogen werden die Fertigungsformen der Fließfertigung und der Baustellenfertigung betrachtet. Doch zuvor werden die Begriffserläuterungen mit dem Fertigungsort fortgesetzt.

Fertigungsort: Die Fertigungsstätten für Bauobjekte können stationär oder mobil ausgebildet sein.

- Die stationäre Werksfertigung wechselt nicht mit dem Bauobjekt den Standort, sondern stellt eine festverankerte Produktionsstätte dar.
- Bei der mobilen Baustellenfertigung werden die Fertigungsanlagen auf der Baustelle installiert und nach Beendigung des Bauvorhabens wieder abgebaut, um an anderen Baustellen wieder aufgebaut zu werden

In jüngster Zeit ist speziell in den USA und der UdSSR auf dem KKW-Sektor eine Herstellungstechnologie für Komponenten und Anlagen publik geworden, die es ermöglicht, eine plattformorientierte Fließfertigung zu errichten. Wie Bild 6.18 zeigt, besteht die Fertigungsanlage aus drei Hauptbereichen: den Produktionsstätten für die Fertigung und Montage von Bauteilen und Teilmontagegruppen, der Bauhelling für die Endmontage der Anlage und den Ausrüstungs- und Erprobungsbereichen.

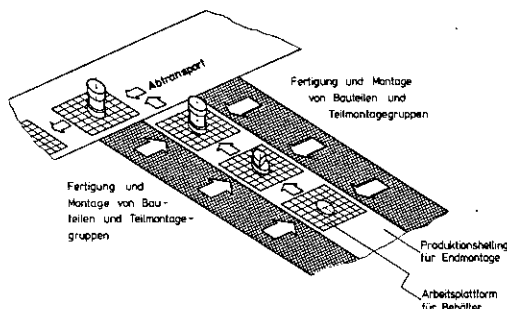


Bild 6.18:

Werftähnliche Fertigungsanlage zur Herstellung von SBB

Detaillierte Konzeptbeschreibungen solcher amerikanischer Fertigungsstätten sind aus /77,78,79,80,81,82/, solche für russische aus /46/ ersichtlich.

6.3.7.2 Mögliche Fertigungsorganisationen des SBB 189

Mit den vorangehenden Begriffserläuterungen sind speziell für die SBB 189-Fertigung in Serie die in Bild 6.19 aufgelisteten Fertigungsorganisationen denkbar.

	Fertigungsort	Transportbeziehung	Identitätsgrad Baustelle/ KKW-Standort
1	mehrere mobile Werke + mehrere Baustellen	ein mobiles Werk versorgt eine Baustelle	Baustelle = KKW-Standort
2	ein mobiles Werk + mehrere Baustellen	ein mobiles Werk versorgt mehrere Baustellen	Baustelle = KKW-Standort
3	ein stationäres Werk + mehrere Baustellen	ein stationäres Werk versorgt mehrere Baustellen	Baustelle = KKW-Standort
4	ein stationäres Werk + eine Baustelle	ein stationäres Werk versorgt eine Baustelle	Baustelle ≠ KKW-Standort

Bild 6.19:
Mögliche Fertigungsorganisationen des SBB 189 in Serie

Die Transportbeziehungen aus diesen Fertigungsorganisationen für das Werk und die Baustelle lassen sich damit wie in Bild 6.20 darstellen.

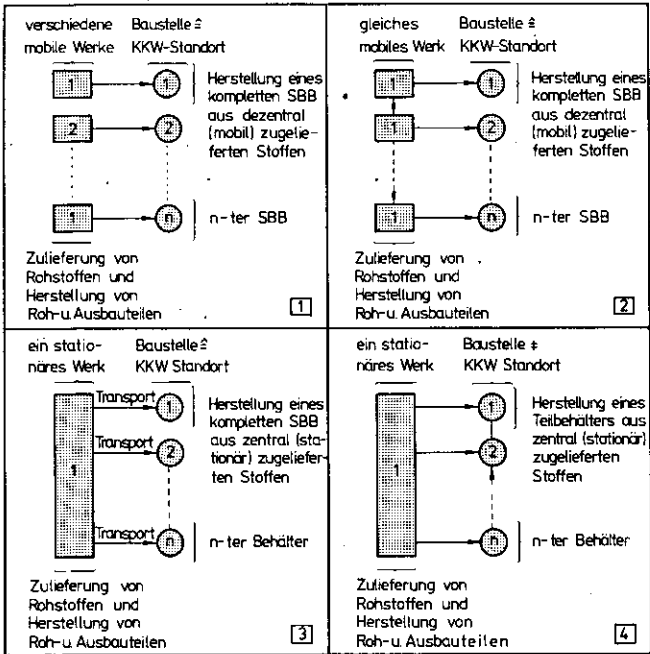


Bild 6.20:
Mögliche Transportbeziehungen bei der SBB 189-Fertigung in Serie

Zur Möglichkeit 1: Hierbei wird von der Überlegung ausgegangen, daß n-SBB zur gleichen Zeit auf mehreren Baustellen gefertigt werden und die Baustelle dem künftigen KKW-Standort entspricht. Jeder dieser Baustelle ist ein separates mobiles Werk zugeordnet, das die jeweilige Baustelle mit Roh- und Hilfsstoffen sowie Behälterroh- und -ausbauelementen versorgt. Auf jeder Baustelle entsteht ein kompletter Behälter.

Die Vorteile dieser Organisation liegen in den geringen Transportentfernungen von Fabrikations- zur Baustelle, der günstigen Beweglichkeit der Fertigungsanlagen sowie in den relativ geringen Investkosten. Allerdings stehen diesen Vorteilen die Nachteile der Witterungsabhängigkeit und damit verbunden die schlechteren Arbeitsbedingungen, die Unsicherheit der Mobilität des Personals und mit Einschränkungen die geringere Qualität der Bauelemente gegenüber.

Diese Fertigungsorganisation findet man heute bei der Einzelfertigung von KKW verwirklicht; sie würde bei der Serienfertigung von SBB sicherlich dann angewendet werden, wenn der einzelne SBB so groß baut, daß die Transportkosten für die Zulieferung sehr stark ins Gewicht fallen, oder wenn große, unförmige Zulieferteile vorhanden sind, die an die Beladefähigkeit der Transportfahrzeuge stoßen oder nach der Straßenverkehrsordnung nicht transportierbar sind, wenn die Seriengröße an SBB relativ klein ist und eine gewisse Investitionssumme für die n-Baustelleneinrichtungen gerechtfertigt erscheint.

Zur Möglichkeit 2: Die Organisation sieht hier vor, daß die Behälter zeitversetzt gefertigt werden, wobei das gleiche mobile Werk nach Arbeitsvollzug am Behälter 1 zur Baustelle 2 verfährt, um dort am Behälter 2 die gleichen Arbeiten durchzuführen. Dabei kann der erwähnte Arbeitsvollzug die komplette Behälterfertigung bedeuten oder aber nur bestimmte Arbeitsabschnitte ergänzen.

Sind die Voraussetzungen der Fertigungsorganisation 1 teilweise nicht mehr erfüllt, ist die Investition aus der Summe der Baustelleneinrichtungen aller mobiler Werke nicht mehr vertretbar oder ist die Seriengröße an SBB sehr klein, so bietet sich die Fertigungsorganisation 2 an, die ansonsten die gleichen Vor- und Nachteile wie die Fertigungsorganisation 1 aufweist.

Zur Möglichkeit 3: Tendiert die Fertigungsserie an SBB zu größeren bis großen Stückzahlen, wobei es hier sehr schwierig ist eine absolute Zahl zu nennen, da oft die nachfolgend beschriebenen stationären Werke auch gleichzeitig andere Auftraggeber mit Bauelementen versorgen, die nichts mit dem SBB-Bau

zu tun haben, so richtet man anstelle der mobilen Werke stationäre ein, wobei mit einem stationären Werk gleichzeitig n verschiedene Baustellen mit Zulieferungen versorgt werden. Die Zulieferung von Roh- und Hilfsstoffen sowie der Roh- und Ausbauelemente bedarf des Transportes.

Vorteilig ist diese Fertigungsorganisation 3 durch eine gute Qualität der Bauteile, festes, spezialisiertes Stammpersonal und durch die Witterungsunabhängigkeit, was allerdings durch die höheren Investitionskosten der Fertigungseinrichtungen des stationären Werkes sowie durch die Einengung der Anwendung auf ein dichtes Netz von KKW-Standorten im Umkreis von 150 km vom zentralen Werk aus beeinträchtigt wird.

Zur Möglichkeit 4: Die beste Annäherung an eine industrialisierte Bauproduktion ergibt sich durch die Anwendung der Fertigungsorganisation 4, bei der eine Fließformation verwirklicht wird. Die SBB werden in einer Fließreihe gefertigt (Gestaltungsmöglichkeiten dazu sind in /83/ gegeben), wobei der SBB von Arbeitsstation zu Arbeitsstation bewegt wird und diese entsprechend dem technologischen Arbeitsfortschritt angeordnet sind. Für diese notwendige SBB-Bewegung werden in Wasser befindliche Plattformen notwendig.

Für die Herstellung und Montage von Bauteilen und Montagegruppen des SBB versorgt ein auf der Baustelle errichtetes, stationäres Werk die gesamte Fließreihe. Die Bau- bzw. Produktionsstelle ist nicht identisch mit dem KKW-Standort, da die fertigen SBB, und somit KKW samt den Plattformen, zum Küstenmeerstandort geschleppt und dort verankert werden.

Vorteilhaft hierbei ist die Möglichkeit zur Standardisierung, die Anwendung einer Baukastenmontage, die Erzielung eines hohen Vorfertigungsgrades, eine systematische Kontrolle und vor allem die Unabhängigkeit vom landbezogenen KKW-Standort.

Voraussetzung zur Einführung dieser Fertigungsorganisation 4 ist eine ausreichend große Behälterserie, die die hohen Investitionskosten der Fertigungseinrichtungen rechtfertigen und geeignete Küstenstandorte für diese sogenannten off-shore-KKW.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist die erste Voraussetzung aufgrund der gekürzten Zuwachsrate an Kernenergie von 50 000 MW_{e1} zu installierender Leistung auf 15 bis 20 000 MW_{e1} bis zum Jahre 1985 nicht mehr erfüllt. Für die zweite Voraussetzung hat die Fa. Dornier eine Durchführbarkeitsstudie /84/ veröffentlicht, die sich auf die meerestechnischen Belange und Anforderungen beim

Bau von KKW im Bereich der Küstenmeere der Bundesrepublik Deutschland bezieht, und die zu folgendem Schluß kommt:

Zum Standortgebiet: An der nordfriesischen Küste kommen 11, im Elbeastnargebiet 2, an der ostfriesischen Küste 6 und an der Ostseeküste 3 Standorte in Frage, die innerhalb des deutschen Hoheitsgebietes liegen und somit eine Entfernung von der Küstenlinie haben, die nicht mehr als 15 km ausmacht.

Zur Kühlkapazität: Sie ist für die angegebenen Standorte ausreichend, jedoch unter der Voraussetzung, daß nicht alle Standorte KKW-bestückt werden, da die geographische Entfernung der Standorte z. T. sehr gering ist.

Zum Reaktortyp: Prinzipiell kommen für die Kraftwerksinseln alle Reaktortypen in Frage, also LWR, HTR und SNR, doch scheint die kommerzielle Verfügbarkeit derzeit nur mit LWR gegeben zu sein.

Zu Sicherheitsanforderungen: Die Sicherheitsanforderungen in der maritimen Umwelt sind beherrschbar, die sich aus dem Betrieb eines KKW ergeben.

Zum KKW-Fundament: Das KKW kann schwimmend oder festverankert positioniert werden, wobei es bei der Festverankerung entweder auf einer natürlichen oder geschütteten Insel- oder Landzunge im Flachwassergebiet der Küste oder im tiefen Wasser außerhalb der Wattgebiete in Form einer tiefgegründeten Insel gebaut wird und bei der schwimmenden Verankerung am Standort abgesetzt oder auf See mit einer Schutzzone umgeben wird.

7. BAUZEIT UND KOSTEN VON SPANNBETONBEHÄLTERN

Einführend stellt dieses Kapitel den Einfluß verschiedener Behälterparameter auf die Kosten im allgemeinen dar und gibt zur überschlägigen Kostenermittlung von SBB-Komponenten Kostengleichungen an die Hand. Im Anschluß daran werden Bauzeit und Baukosten für den SBB 189 errechnet und der Einfluß der Serie auf Bauzeit und Kosten in Abhängigkeit der Behälterbauweise, der Behältergröße und der Behälterstückzahl abgeschätzt.

7.1 Einfluß von Behälterparametern auf die Kosten

Gezeigt wird der Einfluß der Behälterform und -abmessungen, des Innendruckes, der Spanngliedlänge, der Vorspannkraft und des Vorspanngrades auf die Behälterkosten.

7.1.1 Einfluß der Behälterform, -abmessungen und -druck

Für die in Bild 7.1 gezeigten Behälterformen, Zylinder und Kugel, geben Watters und Barrett /85/ empirische Formeln an, die für einen ersten Kostenvergleich Dispositionswerte liefern, und Kosten/m³ inneres Volumen darstellen.

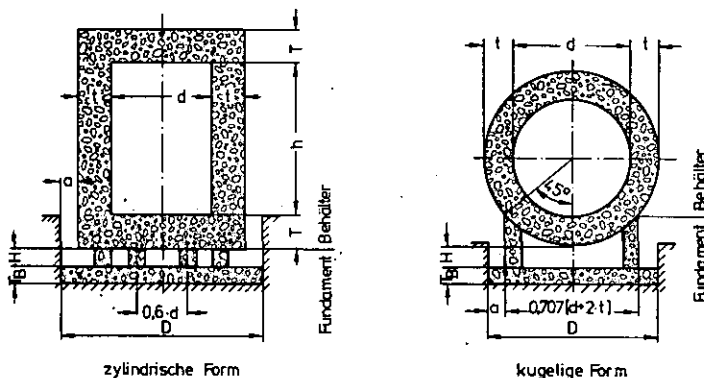


Bild 7.1:

Kugelige und zylindrische Behälterformen für SBB

darin bedeutet:

- d = Innendurchmesser der Behälter (m)
- t, T = Wandstärken der Behälter (m)
- h = innere Höhe der Behälter (m)
- T_B, H, D, a = Werte zur angenäherten Bestimmung von Behältermaterialposten in Abhängigkeit von Dimensions- und Druckparametern (m)
- p = Innendruck der Behälter (kp/cm²)
- K_B = Kosten zur Herstellung der Behälter (DM/m³ inneres Behältervolumen)

Für diese Behälterformen sind in Bild 7.2 die Vergleichskosten/m³ in Abhängigkeit des Druckes und der Behälterabmessungen dargestellt.

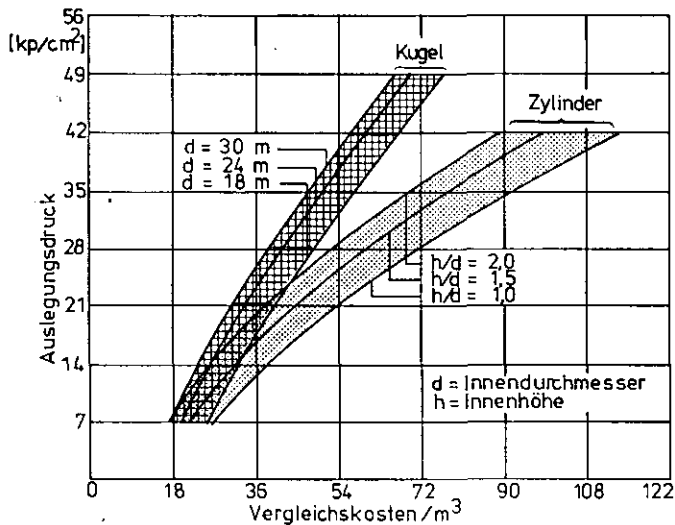


Bild 7.2:

SBB-Kosten in Abhängigkeit des Druckes, der Behälterform und -abmessungen

Die im obigen Bild 7.2 dargestellten Kurven für einen Behälterdurchmesserbereich von 18,5 bis 30,5 m und einem Druckbereich von 14 bis 42 kp/cm² können durch folgende, empirische Formeln angenähert ausgedrückt werden:

Für zylindrische Behälter

$$K_{BZ} = 42,38 + 9,66 p \left(\frac{d}{h} + 1 \right) \left[\frac{3^{DM}}{m^{3 \text{ Inn. Vol.}}} \right]$$

Für kugelige Behälter

$$K_{BK} = \frac{3200}{d} + 7,77 p \left[\frac{3^{DM}}{m^{3 \text{ Inn. Vol.}}} \right]$$

Daraus läßt sich folgendes schließen:

- Für einen zylindrischen Behälter mit einem Durchmesserbereich von 18,5 bis 30,5 m werden die Kosten/m³-inneren Volumens durch das Höhe/Durchmesser-Verhältnis und durch den Druck, aber nur am Rande durch die wirkliche Behältergröße bestimmt.
- Für kugelige Behälter mit Durchmesser von 18,5 bis 30,5 m ergeben sich die Kosten/m³-inneren Volumens durch Druck, Durchmesser und wirkliche Größe des Behälters.
- Zylindrische Behälter, die ein Höhe/Durchmesser-Verhältnis von 2 oder mehr bei gegebenem Volumen haben, sind wirtschaftlicher zu erstellen als Zylinder mit relativ geringer Höhe.
- Ein kugelig Behälter ist, gleiches inneres Volumen vorausgesetzt, wirtschaftlicher zu erstellen als ein zylindrischer.

Basierend auf den Parametern Kosten/m^3 pro kp/cm^2 kann gesagt werden, daß der wirtschaftliche Druckbereich für zylindrische Behälter zwischen 21 und 28 kp/cm^2 und für kugelige Behälter zwischen 42 und 56 kp/cm^2 liegt. In Bild 7.3 ist der wirtschaftliche Bezugspunkt dargestellt, der die wirtschaftliche Grenze beim Anwachsen von Behältergröße und -druck angibt.

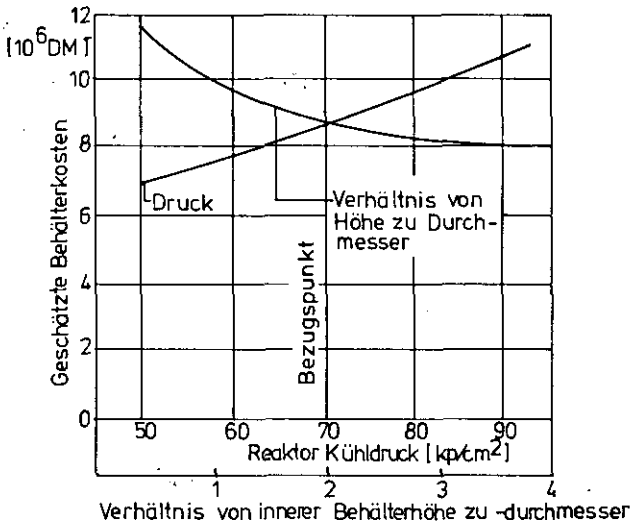


Bild 7.3:

Wirtschaftliche Grenze bei der SBB-Auslegung hinsichtlich des Druckes und der Behältergröße

7.1.2 Einfluß der Spannglieder

Hier sind die Größe und Länge der Spannglieder, die Vorspannkraft und die Anzahl der Spanngliedverankerungsrippen sowie der Vorspanngrad von Bedeutung.

Größe und Länge der Spannglieder: Betrachtet man zunächst die Spanngliedlänge von verschiedenen Größen als Parameter, so stellen sich die folgenden Linienvverläufe für die dazugehörigen Kosten ein /86/ (Bild 7.4).

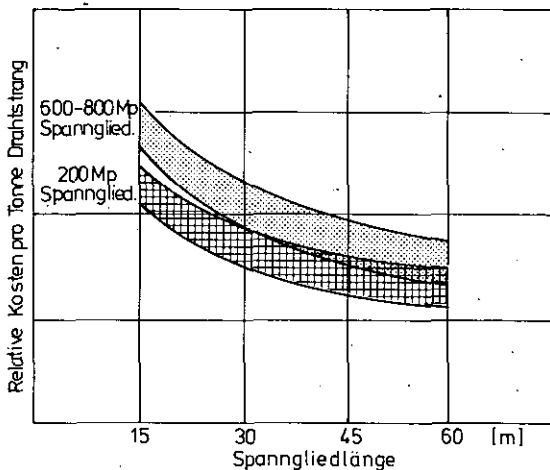


Bild 7.4:

Relative Kosten der Spannglieder für SBB in Abhängigkeit der Länge und der Spanngliedkraft

Die relativen Kosten verstehen sich als Gesamtkosten für das Spannsystem. Diese schließen Verankerung, Bearbeitung, Ausrüstung und Arbeitsposten ein. Ist eine Behälterkonstruktion klein und sind dementsprechend die Spanngliedlängen kurz, so haben die damit verbundenen Spanngliedenden einen großen Einfluß auf die Gesamtkosten. Vergleicht man zwei Spannsysteme wie in Bild 7.4 gezeigt, so ist die Kostendifferenz bei kürzeren Spanngliedern größer.

Vorspannkraft und Anzahl der Spanngliedverankerungsrippen: Neben der Größe und Länge der Spannglieder haben Vorspannkraft und Rippenzahl für die Spanngliedverankerung größenabhängig unterschiedliche Einwirkung auf die Behälterkosten /87/ (Bild 7.5).

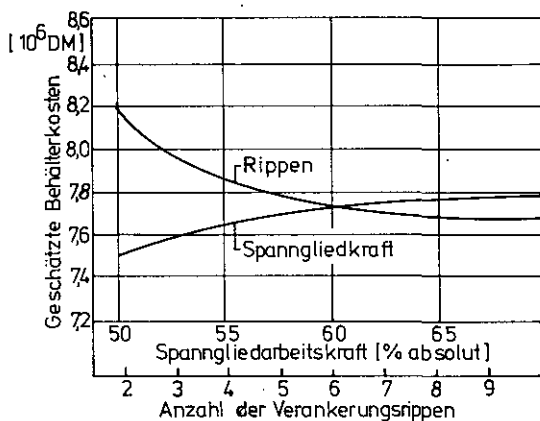


Bild 7.5:

Einfluß der Rippenzahl und der Spanngliedkraft auf die SBB-Kosten

Verändert man bei kleiner Rippenzahl diese Anzahl, so hat dies eine relativ große Kostenänderung zur Folge, was ebenso für die Spanngliedkraft im unteren Bereich zutrifft. Ab einer bestimmten Größe hat eine Änderung dieser Größe in wachsender Richtung nur geringfügige Kostenauswirkungen zur Folge.

Vorspanngrad: Der Einfluß des Vorspanngrades auf die Behälterkosten wird an Hand des SBB THTR Uentrop dargestellt, in dem diese Vorspannkosten mit 100 % angesetzt werden /8/ (Bild 7.6).

Ausgehend von der vollen Vorspannung von 100 %, erreichen die Kosten des SBB bei einem Vorspanngrad von 60 % ein Minimum. Der Grund dafür liegt in der Spannstahleinsparung und den geringeren Behälterwandstärken. Bei noch niedrigeren Vorspanngraden steigen die Vorspannkosten durch den erforderlichen Mehreinbau von Schlaffstahl wieder an. Als relative Kosten sind dabei die Betonkosten und die Kosten der schlaffen und vorgespannten Bewehrung anzusehen.

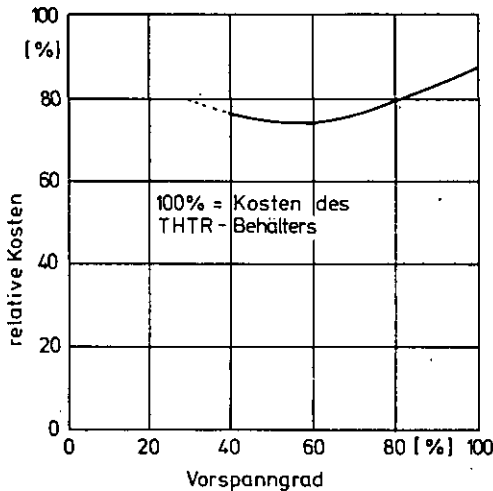


Bild 7.6:

Abhängigkeit der Kosten eines SBB vom Vorspanngrad dargestellt am SBB THTR Uentrop

7.2 Kostengleichungen für die Behälterkomponenten

Für die Berechnung der Kosten der Komponenten eines SBB hat Spencer /87/ in einer Referenzstudie für einen $200 \text{ MW}_{\text{el}}$ gasgekühlten HTR Kostengleichungen abgeleitet, die in deutsche Maß-, Gewichts- und Währungseinheiten übertragen wurden und nachfolgend beschrieben werden. Der Zweck solcher Ableitungen bestand darin, daß sie zusammen mit den Auslegungsgleichungen für einen Computer programmiert werden können und eine vollständige Kostenaufgliederung für jede Anzahl von Ausführungsvarianten ergeben. Ferner können die Kostengleichungen auch dazu benutzt werden, die Auswirkungen verschiedener Auslegungsparameter auf die Kosten aufzuzeigen.

In Betracht kommt ein SBB mit der Hüllenform eines stehenden Zylinders und Zylindercore, erstellt in nichtintegrierter, monolithischer Bauweise, Verwendung einer schlaffen und vorgespannten Bewehrung, wobei die Horizontalvorspannung in Lisenenvorspannung ausgeführt ist, Anordnung eines kalten, festverankerten Liners mit Stahl lamellenisolierung und aufgeschweißten Kühlrohren (Bild 7.7).

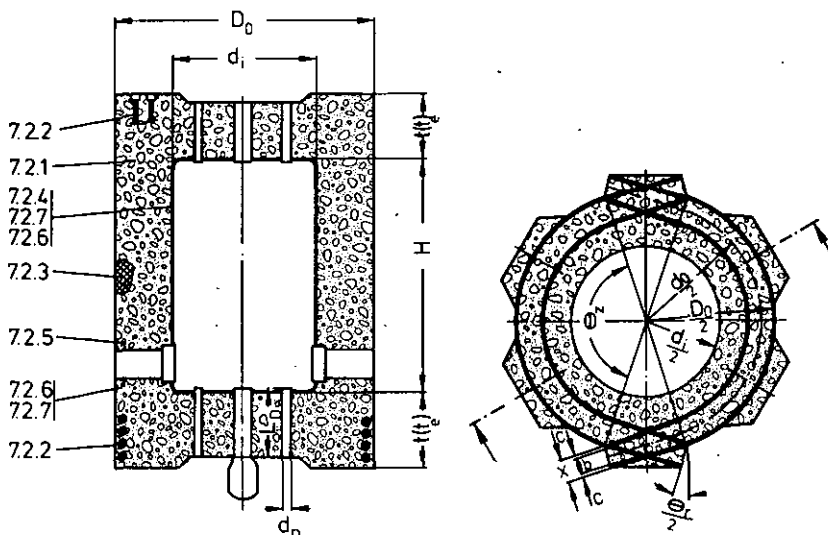


Bild 7.7:

Komponentenerklärung des SBB für die Kostenermittlung

Symbolerklärung zur Kostenberechnung

d_D (m)	= Durchmesser der Durchföhrungsauskleidung (Panzerrohre)
d_i (m)	= Innendurchmesser des Behälters
d_o (m)	= mittlerer Spannglied-Teilkreisdurchmesser
D_o (m)	= Außendurchmesser des Behälters zwischen den Rippen
h (m)	= Höhe einer Spanngliedzone
H (m)	= Innenhöhe des Behälters
L_D (m)	= Länge der Durchföhrungsauskleidung (Panzerrohre)
L_z (m)	= Länge eines jeden zylindrischen Spanngliedes
n_b	= Anzahl der Spannglieder in einem Band
n_e	= Anzahl der Spannglieder in jeder Endplatte
n_h	= Anzahl der Ringspannglieder
n_r	= Anzahl der Rippen
n_v	= Anzahl der vertikalen Vorspannglieder
n_z	= Anzahl der Ringspanngliedschichten in einer Zone
r (m)	= Radius der Endplatte
t_e (m)	= Dicke der Endplatte
V_B (m ³)	= Gesamtmenge an Bewehrungsstäben
x (m)	= von einem Spanngliedband eingenommene radiale Breite
σ_r (°)	= von einer Rippe abgegrenzter Winkel
K_B (DM)	= Kosten der Betonhülle
K_{SB} (DM/m ³)	= spezifische Kosten von Ortbeton
K_{SS} (DM/m ²)	= spezifische Kosten für die Schalung
K_{fs} (DM)	= Kosten für Spezialschalungen
K_{SSP} (DM/m)	= spezifische Material- und Lieferkosten der Spannglieder und spezifische Kosten der Spanngliedrohre
K_{SO} (DM/Stck)	= spezifische Kosten der Ortsverankerung der Spannglieder
K_{ZSp} (DM)	= Kosten der zylindrischen Spannglieder und Verankerungen
K_{VSp} (DM)	= Kosten der vertikalen Spannglieder
K_{eSp} (DM)	= Kosten der Endplattenspannglieder und Verankerungen
K_{SD} ($\frac{DM}{Spannglied}$)	= spezifische Kosten für das Durchfödeln der Spannglieder durch die Rohre
K_{SV} ($\frac{DM}{ges. Verank}$)	= spezifische Kosten für das Vorspannen
K_{SD+SV} (DM)	= Kosten für das Durchfödeln und Vorspannen der Spannglieder
K_{EO} (DM)	= spezifische Kosten der Spanngliedüberwachung
K_{SO} (DM)	= Kosten der Spanngliedüberwachung
K_{SB} (DM/kp)	= spezifische Kosten des Betonstahls auf der Baustelle
K_{SE} (DM/kp)	= spezifische Kosten der Einbringung des Betonstahls
K_{BW} (DM)	= Kosten der schlaffen Bewehrung
K_{SWA} (DM/kp)	= spezifische Kosten der Wandauskleidung (Liner)
K_{WA} (DM)	= Kosten der Wandauskleidung
K_{DA} (DM)	= Kosten der Durchföhrungsauskleidung (Panzerrohre) pro Durchföhrung
K_{SIh} (DM/m ²)	= spezifische Kosten der Stahllamellenisolierung an den horizontalen Wandoberflächen
K_{Siv} (DM/m ²)	= spezifische Kosten der Stahllamellenisolierung an den vertikalen Wandoberflächen
K_{SID} (DM/m ²)	= spezifische Kosten der Isolierung an den Durchföhrungsoberflächen
K_{WI} (DM)	= Gesamtkosten der Isolierung
K_K (DM)	= Kosten der Köhlrohre für die Wand- und Durchföhrungsauskleidungen und für die Verbindungsrohre durch den Beton

7.2.1 Kosten der Behälterhülle aus Beton

Die Berechnung der Kosten für die Behälterhülle K_B erfolgt nach der Gleichung:

$$K_B = K_{SB} \left[\frac{\pi}{4} (D_o^2 - d_i^2) H + r(H+1,83) \left(D_o - \frac{x}{12} \right) \frac{x}{12} \sin^2 \frac{\theta_r}{2} + 2t_e \frac{\pi}{4} D_o^2 \right] +$$

$$K_{SS} \left[\frac{\pi}{2} D_o^2 + D_o(H+2t_e) + r(H+1,83) \left\{ \left(D_o - \frac{x}{6} \right) \sin \frac{\theta_r}{2} + \frac{x}{6} - \frac{D_o}{2} \theta_r \right\} \right] +$$

$$K_{fS}$$

K_B (DM) = Kosten der Betonhülle

K_{SB} (DM/m³) = spezifische Kosten von Ortbeton

K_{SS} (DM/m²) = spezifische Kosten der Schalungen

K_{fS} (DM) = Kosten für die Spezialschalungen

D_o (m) = Außendurchmesser des Behälters zwischen den Rippen

d_i (m) = Innendurchmesser des Behälters

H (m) = Innenhöhe des Behälters

r (m) = Radius der Endplatte

x (m) = von einem Spanngliedband eingenommene, radiale Breite

θ_r (°) = von einer Rippe abgegrenzter Winkel

t_e (m) = Dicke der Endplatte

7.2.2 Kosten der Spannglieder

Die Kosten der Spannglieder setzen sich aus den Herstellkosten der zylindrischen, der vertikalen und Endplattenspannglieder, der für das Durchfädeln und Vorspannen und der für die Spanngliedüberwachung zusammen.

Zylindrische Spannglieder: Bei der Lisenenvorspannung ist die Anzahl der zylindrischen Ringspannglieder gegeben durch

$$n_z = n_r n_b (H+1,83) \frac{1}{h}$$

n_z = Anzahl der Ringspannglieder

n_r = Anzahl der Rippen

n_b = Anzahl der Spannglieder in einem Band

h (m) = Höhe der Spanngliedzone

H (m) = Innenhöhe des Behälters

Die Kosten in DM der zylindrischen Spannglieder und Verankerungen K_{ZSP} sind dann gegeben durch

$$K_{ZSP} = n_z(L_z+1,22)K_{SSP} + 2n_zK_{SO}$$

K_{SSP} (DM/m) = spezifische Material- und Lieferkosten der Spannglieder und Spanngliedrohre

K_{SO} (DM/Stck) = spezifische Kosten der Ortsverankerung der Spannglieder

n_z = Anzahl der Ringspannglieder

$L_z+1,22$ (m) = Länge eines jeden zylindrischen Spanngliedes unter Berücksichtigung von ca. 60 cm Abgang an jeder Verankerung

Vertikale Spannglieder: Die Kosten in DM der vertikalen Spannglieder und Verankerungen K_{VSP} unter Berücksichtigung von ca. 60 cm Abgang an jeder Verankerung errechnen sich zu

$$K_{VSP} = K_{SSP}n_v(H+2t_e+1,22) + 2K_{SO}n_v$$

n_v = Anzahl der vertikalen Vorspannglieder

H (m) = Innenhöhe des Behälters

t_e (m) = Dicke der Endplatte des Behälters

K_{SSP} (DM/m) = spezifische Material- und Lieferkosten der Spannglieder und Spanngliedrohre

K_{SO} (DM/Stck) = spezifische Kosten der Ortsverankerung der Spannglieder

Endplattenspannglieder: Die Kosten in DM der Endplattenspannglieder K_{eSp} unter Berücksichtigung von ca. 60 cm Abgang an jeder Verankerung betragen

$$K_{eSp} = 2n_e(1,75d_iK_{SSP}+2K_{SO})$$

n_e = Anzahl der Spannglieder in jeder Endplatte

d_i (m) = Innendurchmesser des Behälters

K_{SSP} (DM/Stck) = spezifische Material- und Lieferkosten der Spannglieder und Spanngliedrohre

K_{SO} (DM/m) = spezifische Kosten der Ortsverankerung der Spannglieder

Durchfädeln und Vorspannen: Die Kosten für das Durchfädeln der Spannglieder durch die Rohre und die für das Vorspannen K_{SD+SV} in DM sind gegeben durch die Gleichung

$$K_{SD+SV} = K_{SD}(n_z + n_v + 2n_e) + K_{SV}(2n_z + n_v + 2n_e)$$

$K_{SD} \left(\frac{\text{DM}}{\text{Spannglied}} \right)$	= spezifische Kosten für das Durchfädeln der Spannglieder durch die Rohre
$K_{SV} \left(\frac{\text{DM}}{\text{Verankerung}} \right)$	= spezifische Kosten für das Vorspannen
n_z	= Anzahl der Ringspannglieder in einer Zone
n_v	= Anzahl der vertikalen Spannglieder
n_e	= Anzahl der Spannglieder in jeder Endplatte

Spanngliedüberwachung: Die Kosten der Spanngliedüberwachung K_{SO} in DM betragen

$$K_{SO} = K_{EO}(n_h + n_v + 2n_e)$$

$K_{EO} \left(\frac{\text{DM}}{\text{Spannglied}} \right)$	= spezifische Kosten der Spanngliedüberwachung
n_h	= Anzahl der Ringspannglieder
n_v	= Anzahl der vertikalen Spannglieder
n_e	= Anzahl der Spannglieder in jeder Endplatte

7.2.3 Kosten der schlaffen Bewehrung

Die Berechnungen der Kosten der schlaffen Bewehrung K_{BW} in DM erfolgt nach der Gleichung

$$K_{BW} = 7750 V_B (K_{SB} + K_{SE})$$

$K_{SB} \text{ (DM/kp)}$	= spezifische Kosten des Betonstahls
$K_{SE} \text{ (DM/kp)}$	= spezifische Kosten der Einbringung des Betonstahls
$V_B \text{ (m}^3\text{)}$	= Gesamtmenge an Bewehrungsstäben

7.2.4 Kosten der Wandauskleidung (Liner)

Die Kosten der 20 mm starken Stahlauskleidung mit Versteifungs- und Verankerungsrippen wurden im einzelnen geschätzt unter Berücksichtigung für Material und Blechherstellung in der Werkstatt, Transport zur Baustelle, Baustellenfertigung und Montage sowie Schweißstellendichtheitsprüfung. Sie errechnen sich zu

$$K_{WA} = 7750 K_{SWA} \left(\frac{\pi}{2} d_i^2 + \pi d_i H \right) t_L$$

K_{SWA} (DM/kp)	= spezifische Kosten der Wandauskleidung
d_i (m)	= Innendurchmesser des Behälters
H (m)	= Innenhöhe des Behälters
t_L (m)	= Dicke des Liners

7.2.5 Kosten der Durchführungsauskleidung (Panzerrohre)

Die Länge der Durchführungsauskleidung beträgt L_D und ihr Durchmesser d_D . Die Auskleidung ist dabei ein geschweißtes Flußstahlrohr mit einer Dicke $D/10$. Am inneren Ende des Rohres ist eine geschmiedete Verlängerung mit Druckflansch angeschweißt. Das Schmiedestück ist im Beton rückwärtig verankert. Unter Berücksichtigung der Herstellung, der Prüfung aller Schweißnähte und der Montage ergibt sich folgender Ausdruck für die Kosten einer jeden Durchführung K_{DA} in DM

$$K_{DA} = 0,46 d_D^3 L_D + 6,06 d_D^2 L_D + 14,80 d_D^3 + 155,23 d_D L_D + 50,10 d_D$$

d_D (m)	= Durchmesser der Durchführungsauskleidung
L_D (m)	= Länge der Durchführungsauskleidung

Die Gesamtkosten der Durchführungsauskleidung errechnen sich aus der Summe der Einzelkosten der Durchführungsauskleidungen.

7.2.6 Kosten der Auskleidungsisolierung

Die Kosten der Auskleidungsisolierung setzen sich aus den Kosten der Isolierung der Durchführungen K_{DI} und der der Wand K_{WI} zusammen und werden mit nachfolgenden Gleichungen berechnet.

$$K_{WI} = \frac{\pi d_i}{2} (d_i K_{SIh} + 2HK_{SIV})$$

$$K_{DI} = \frac{\pi}{12} K_{SID} \sum (d_D L_D)$$

- d_i (m) = Innendurchmesser des Behälters
 d_D (m) = Durchmesser der Durchführungsauskleidung
 L_D (m) = Länge der Durchführungsauskleidung
 H (m) = Innenhöhe des Behälters
 K_{SIh} (DM/m²) = spezifische Kosten der Stahllamellenisolierung an den horizontalen Wandoberflächen
 K_{SIV} (DM/m²) = spezifische Kosten der Stahllamellenisolierung an den vertikalen Wandoberflächen
 K_{SID} (DM/m²) = spezifische Kosten der Isolierung an den Durchführungsflächen

7.2.7 Kosten der Auskleidungskühlung

Eine detaillierte Schätzung der Kosten K_K in DM der an die Wandauskleidung und an die Durchführungsauskleidungen angeschweißten Rohrleitungen sowie der durch den Beton hindurchführenden Verbindungsrohre ergeben den folgenden Ausdruck:

$$K_K = 200 \left\{ \pi 6 d_i \left[6H + \sqrt{(3t_e)^2 + \left(\frac{3D_o - 3d_i}{2}\right)^2} \right] + 4 \left[3d_i + 4 \sum_{j=1}^{J=\frac{3}{2}d_i} \sqrt{\left(\frac{3d_i}{2}\right)^2 - j^2} \right] \cdot \left[1 + \frac{1}{18d_i} \sqrt{(3t_e)^2 + \left(\frac{3D_o - 3d_i}{2}\right)^2} \right] + 2,5 \sum (L_D d_D) \right\}$$

- d_i (m) = Innendurchmesser des Behälters
 H (m) = Innenhöhe des Behälters
 t_e (m) = Dicke der Endplatten des Behälters
 D_o (m) = Außendurchmesser des Behälters zwischen den Rippen
 L_D (m) = Länge der Durchführungsauskleidung
 d_D (m) = Durchmesser der Durchführungsauskleidung

Beispiel einer Kostenanalyse

Um eine Vorstellung über die Höhe der anfallenden Kosten sowie deren Aufschlüsselung in den unterschiedlichen Produktionsbereichen zu vermitteln, ist in Bild 7.8 eine Aufgliederung der Liner-, Kühlrohr-, Panzerrohr- und Behälterabschlußkosten gegeben, die sich auf den SBB HTR 1160 beziehen.

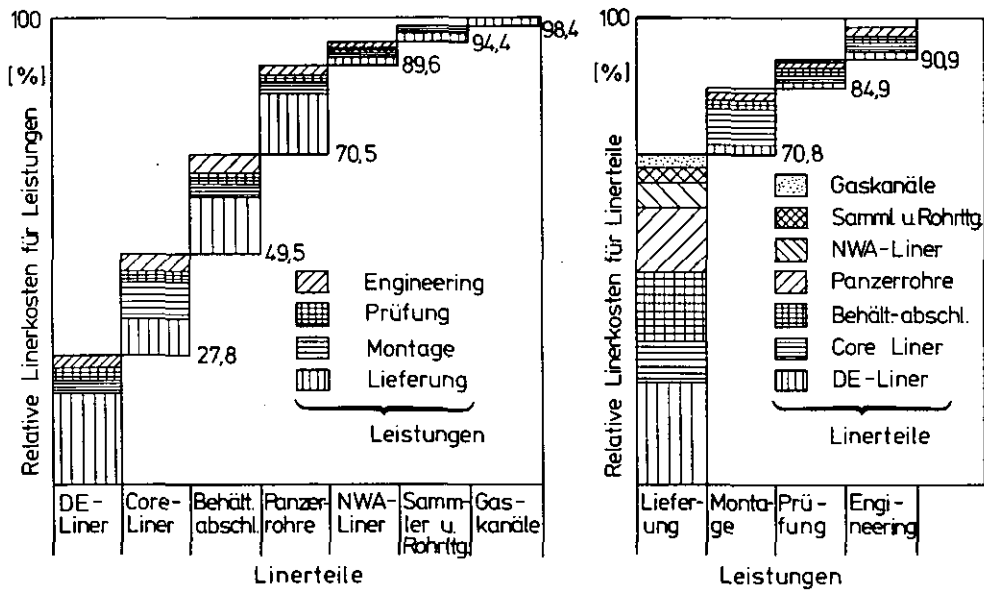


Bild 7.8: Kostenanalyse einiger Komponenten beim SBB HTR 1160

Augenfällig dabei ist, daß den größten Kostenanteil mit 60 bis 70 % der Gesamtkosten die Lieferkosten (=Herstellung + Transport) einnehmen und die Kosten für die Prüfung, Montage und Engineering den 30 %-igen Kostenrest zu je gleichen Teilen unter sich aufteilen. Dabei belaufen sich die 100 % Gesamtkosten auf der Preisbasis vom Februar 1977 auf 68 Mio DM.

7.3 Bauzeiten verschiedener Behältergrößen und -bauweisen

Bei der Bauzeitermittlung ergab sich eine Differenzierung aus der Behälterbauweise und dem Vorspannsystem sowie aus der Behältergröße, wobei die in **Bild 7.9** aufgeführten SBB-Benennungen wiederum die Leistungsgröße des Reaktors in MW_{el} -Leistung ausdrücken. Der Liner wird parallel neben der Baustelle gefertigt und nach Fertigstellung der Betonzylinderwand in den Behälter eingehoben. Als Fertigungsorganisation wird die beschriebene Möglichkeit 3, also stationäre Fabrik und Fertigung der SBB hintereinander, zu Grunde gelegt.

	SBB	189	600	900	1200
Betonstützkörper	Monolith , radial	9,5	14,5	19,0	22,5
	Monolith , wickeln	7,5	11,5	15,0	18,0
	Block, aufweiten	7,0	10,0	14,0	17,0
	Block, wickeln	6,5	9,0	13,5	16,0
	Segment, wickeln	8,0	12,0	16,0	20,0
Liner	Parallele Panelschweiß.	3,5	4,7	6,1	8,0

Bild 7.9:

Schätzzeiten in Monate für die unterschiedlichen SBB-Größen und SBB-Bauweisen bei nichtintegrierter Behälteranordnung

Für diese Behältertypen läßt sich dann folgendes feststellen:

- Die Bauzeitzunahme bei allen Behältergrößen in Abhängigkeit der Behälterbauweise und des Vorspannsystems ist trendmäßig überall gleich.
- Den meisten Zeitaufwand beim SBB 189 mit 9,5 Monaten benötigt die monolithische Behälterbauweise mit dem Radialspannverfahren, bedingt durch die aufwendige Vorspanntechnik, die ein unterteiltes Betonzylinderwandgießen in einen äußeren und einen inneren Wandungsteil erforderlich macht.
- Wendet man stattdessen das in der Handhabung günstigere Wickelspannverfahren an, so sinkt die dafür erforderliche Bauzeit auf 7,5 Monate.
- Schöpft man zusätzlich noch den Vorteil der Vorfertigung aus, in dem die Betonzylinderwand aus einzelnen Blöcken in der Fabrik oder auf der Baustelle vorgefertigt werden, so sinkt der Bauzeitaufwand auf 6,5 Monate.
- Die Zeitangabe für die Linerfertigung bezieht sich nur auf das Zusammenschweißen des Linerkörpers ohne jegliche Vorfertigung und Vormontage und ist unabhängig von der Behälterbauweise
- Die Bauzeitzunahme durch die verschiedenen Behältergrößen ist nicht konstant; so beträgt die Zunahme vom monolithisch radialvorgespannten SBB 189 zum in gleicher Weise hergestellten SBB 600 52 % und vom monolithisch radialvorgespannten SBB 900 zum SBB 1200 nur noch 18 %. Diese ist auf eine reduzierte Zunahme an Baustoffmengen bei größeren Behältern zurückzuführen.

Bild 7.10 stellt die Bauzeiten für verschiedene Behältergrößen und -bauweisen dar.

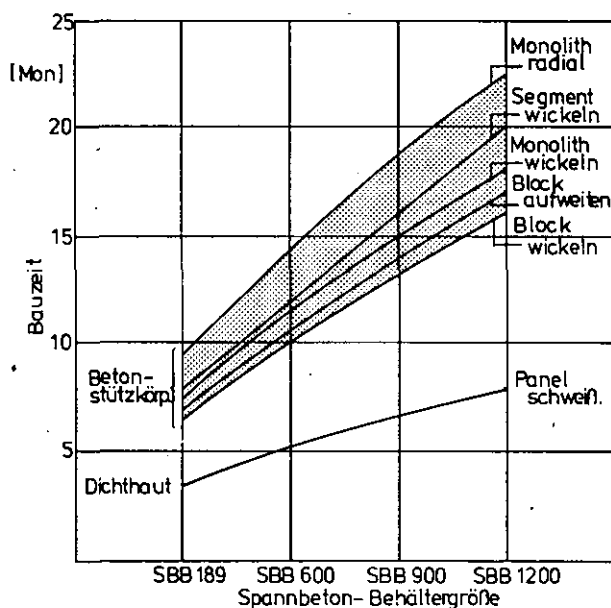


Bild 7.10:

Schätzzeiten verschiedener Behältergrößen und -bauweisen bei nichtintegrierter Behälteranordnung

7.4 Baukosten des Spannbetonbehälters SBB 189

Analysiert man den SBB 189 mit den metallischen Einbauten, so zeigt sich das Kostenbild 7.11. Die zur Kalkulation verwendeten Preise entsprechen Tagespreisen, wie sie von /71,88,89/ als Lohn- und Materialpreise, Stand Februar 1977 mitgeteilt wurden. Um diese Kostenanalyse für eine Diskussion transparenter zu machen, wird in Bild 7.12 eine andere Kostengruppierung vorgenommen.

Nr.	Position	Menge	Spez. Preise 1977	Kosten Mio DM	% an K _{ges}
1	Beton (Bn 550)	2 609 m ³	250,-- DM/m ³	0,65	2,9
2	Gerüst und Schalung	1 874 m ²	260,-- DM/m ²	0,49	2,2
3	Schlaffstahl	186 t	2 500,-- DM/t	0,47	2,1
4	Spannstahl -vertikal -horizontal	56,4 t 145,2 t	10 000,-- DM/t 10 000,-- DM/t	0,56 1,45	2,5 6,4
5	Wandauskleidung (Liner) mit Kühlung	79 t ₂ 433 m	10 500,-- DM/m ²	4,55	20,2
6	Durchführungsauskleidung (Panzerrohre)mit Kühlung	50 t	45 000,-- DM/t	2,25	10,0
7	Wand-(Liner-) Isolierung aus Kohlestein	433 m ²	8 000,-- DM/m ²	3,46	15,4
8	Durchführungs-(Panzerrohr-) Isolierung	140 m ²	15 000,-- DM/m ²	2,10	9,3
9	Behälterabschlüsse		pauschal	1,00	4,4
10	Behälterlagerung		pauschal	0,01	0,1
11	Behälterinstrumentierung		pauschal	2,20	9,9
12	Baustellenein- und -abrückung		(8-10) % v. K _{ges}	2,00	8,8
13	Technische Bearbeitung		(6-8) % v. K _{ges}	1,6	7,0
Σ	Gesamter Behälter		K _{ges} =	22,79	100

Bild 7.11:

Komponentenweise
Kostenerfassung
des SBB 189

Nr.	Position	Spez. Preise 1977	Kosten 1977			
			Mio DM	%	Σ Mio DM	Σ %
1	Beton (Bn 550)	250,--DM/m ³	0,65	2,9	1,61	7,2
2	Schlaffstahl	2 500,--DM/t	0,47	2,1		
3	Gerüste und Schalung	260,--DM/m ²	0,49	2,2		
4	Spannstahl -vertikal -horizontal	10 000,--DM/t 10 000,--DM/t	0,46 1,45	2,5 6,4	2,01	8,9
5	Wände -Auskleidung -Isolierung -Kühlung	2 500,--DM/m ² 8 000,--DM/m ² 8 000,--DM/m ²	1,08 3,46 3,46	4,7 15,2 15,2		
6	Durchführungen -Auskleidung -Isolierung -Kühlung	10 000,--DM/t 15 000,--DM/t 35 000,--DM/t	0,50 2,10 1,75	2,2 9,2 7,7	4,35	19,1
7	Behälterabschlüsse		1,00	4,5		
8	Behälterlagerung		0,01	0,1	0,01	0,1
9	Instrumentierung		2,20	9,9	2,20	9,7
10	Baustelleneinrichtung	(8-10 %)K _{ges}	1,90	8,6	2,00	8,8
11	Technische Bearbeitung	(6-8 %)K _{ges}	1,50	6,7	1,60	7,0
Σ	Gesamter Behälter		K _{ges} =		22,79	100,0

oder mit anderen Komponentengruppierungen der Positionen 5 und 6:

5/5 a	Auskleidungen -Wand -Durchführungen	1,08 0,50	4,7 2,2	1,58	6,9
5/6 b	Isolierungen -Wand -Durchführungen	3,46 2,10	15,2 9,2		
5/6 c	Kühlungen -Wand -Durchführungen	3,46 1,75	15,2 7,7	5,21	22,9

Bild 7.12:

Gruppenweise
Kostenerfassung
des SBB 189

Aus diesen Aufgliederungen ergeben sich für den SBB 189 folgende Schlußfolgerungen:

- Der Beton mit seiner schlaffen Bewehrung einschließlich Gerüste und Schalung macht ca. 7 % der Gesamtkosten aus.
- Die Kosten der Spannglieder liegen mit 9 % in der gleichen Größenordnung, so daß der Betonstützkörper samt Vorspannung knapp 1/5 der Gesamtbehälterkosten ausmacht.
- Die Auskleidungen (ohne Kühlung) der Wand und der Durchführungen sind mit rund 7 % der Gesamtkosten nicht teuer.
- Dafür macht die Kühlung der Wand und der Durchführungen rund 23 % der Gesamtkosten aus und stellt zusammen mit den Auskleidungen für Wand und Durchführungen mit ca. 30 % die teuerste SBB-Komponente dar.
- Die Isolierkosten der Durchführungen und der Wand betragen rd. 25 % und machen mit den Kosten der Wandauskleidung ca. 50 % der Gesamtbehälterkosten aus.

7.5 Baukosten verschiedener Behältergrößen und -bauweisen

Teilt man die Behälterkosten, wie bei der Behälterbauzeit, nach Bauweise, Vorspannsystem und Behältergröße auf, so ergeben sich dafür folgende Kosten (Bild 7.13)

	SBB	189	600	900	1200
Betonstützkörper	Monolith , radial	5,6	8,2	12,2	17,5
	Monolith , wickeln	4,2	6,0	8,2	11,0
	Block, aufweiten	4,3	6,9	10,6	13,1
	Block, wickeln	4,6	6,8	9,7	13,3
	Segment, wickeln	6,0	9,2	13,0	17,8
Liner	Parallele Paneelschweiß.	4,8	6,2	8,2	11,0

Bild 7.13:

Schätzkosten in Mio DM für die unterschiedlichen SBB-Größen und SBB-Bauweisen bei nicht-integrierter Behälteranordnung

Daraus läßt sich folgendes ableiten:

- Die Baukostenzunahme innerhalb einer Behälterbauweise ist von einer zur nächsten Behältergröße in etwa gleich.
- Den größten Kostenaufwand beim SBB 189 verursacht die Segmentschalenbauweise mit dem Wickelvorspannsystem mit 6,0 Mio DM, obwohl sie mit 8,0 Monaten Bau-

zeit (siehe Bild 7.9) nicht die bauzeitaufwendigste Behälterbauweise ist. Der Grund dafür ist im Investitionsaufwand der für die Vorfertigung benötigten Fertigungseinrichtungen zu sehen, die komplizierter und damit teurer als die für die Blöcke sind.

- Beim radialvorgespannten, monolithischen Behälter schlägt sich die komplizierte Vorspannung zeit- wie auch kostenmäßig negativ zu Buche.
- Die gleiche monolithische Bauweise mit dem einfachen Wickelspannverfahren ist die billigste, obwohl sie zeitmäßig nur an dritter Stelle rangiert. Dies ist durch den Wegfall der kapitalintensiven Vorfertigungseinrichtungen sowie durch den Einsatz von Hub- und Montagegeräten auf der Baustelle begründet.

Bild 7.14 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Investkosten der verschiedenen Behältergrößen und -bauweisen. Für die Linerbauweise wird dabei bei den unterschiedlichen Bauweisen der Betonhüllen jedesmal die gleiche Herstellungstechnologie vorausgesetzt.

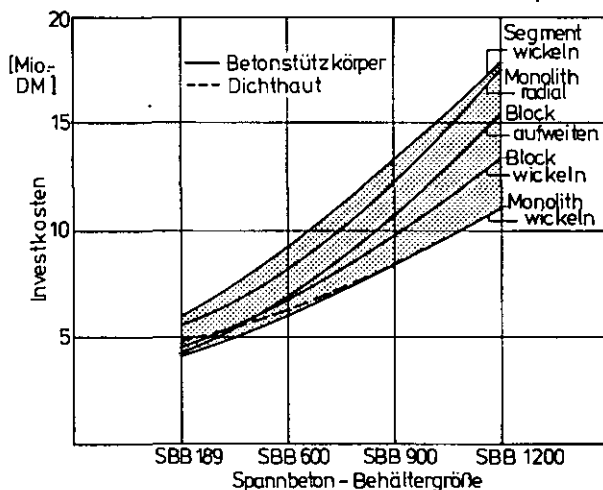


Bild 7.14:

Schätzkosten verschiedener Behältergrößen und -bauweisen bei nichtintegrierter Behälteranordnung

7.6 Auswirkungen der Serienauflage von Spannbetonbehältern auf Bauzeit und Kosten

Die Betrachtungen zur Bauzeit- und Baukostenreduktion durch die Serienfertigung an Spannbetonbehältern werden an den SBB-Komponenten Behälterhülle mit schlaffer Bewehrung, Vorspannung, Liner und Kühlsystem durchgeführt, da diese, wie schon gezeigt, die Hauptanteile an den Gesamtkosten ausmachen.

7.6.1 Behälterbauzeit für den Serienbehälter SBB 189

Allgemein formuliert entstehen die Zeit- und Kostenvorteile einer Serienfertigung in drei Bereichen: Der eine Bereich umfaßt alle einmaligen Aufwendungen wie Berechnung, Planung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung usw. (echte Degression). Der zweite Bereich bezieht sich auf Arbeitsverfahren, Mechanisierung und Automatisierung (organisationsbedingte Degression). Der dritte Bereich ergibt sich aus größerer Übung im Arbeitsvollzug (übungsbedingte Degression).

Speziell ergibt sich für den Betonstützkörper eine Bauzeitreduktion für alle Behältergrößen, die mit 2 % bei einer Verdoppelung der Behälterstückzahl von 1 auf 2 Behälter sehr gering ist, und die sich bei 30 Behältern auf 4 % erhöht (Bild 7.15). Damit kann festgestellt werden, daß die Serienauflage von Betonstützkörpern auf die Bauzeit nur ganz geringen Einfluß hat.

Bei der Serienfertigung der dazugehörigen Liner macht sich die Serienauflage schon deutlicher bemerkbar, deren Bauzeit bei einer Stückzahl von Linern bereits um 20 % und bei 30 Linern um 30 bis 35 % sinkt.

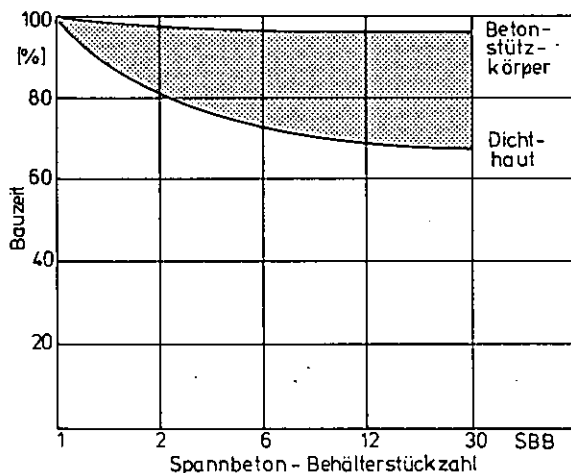


Bild 7.15:

Geschätzte Bauzeitdegression für Betonstützkörper und Liner durch eine Serienauflage beim SBB 189

Der größte Teil der Zeiteinsparungen bei der Linerherstellung durch die Serie dürfte im Berechnungsfeld liegen, in dem die umfangreichen Detailberechnungen wie Spannungsanalyse, Beulanalyse, wärmetechnische Berechnung im stationären und instationären Zustand, Grenzlastbetrachtung, Lebensdaueranalyse, Berechnung der Auslegung der Versteifungsgerüste und Erfassung der Linerzustände in den einzelnen Montagephasen durchgeführt werden und die sich ab dem zweiten Behälter auf ca 10 % reduzieren.

7.6.2 Behälterkosten für den Serienbehälter SBB 189

Im allgemeinen bestehen die Kosten eines Serienproduktes aus losgrößenabhängigen (K_{SL}) und losgrößenneutralen Kostenanteilen (K_{SN}) (Bild 7.16).

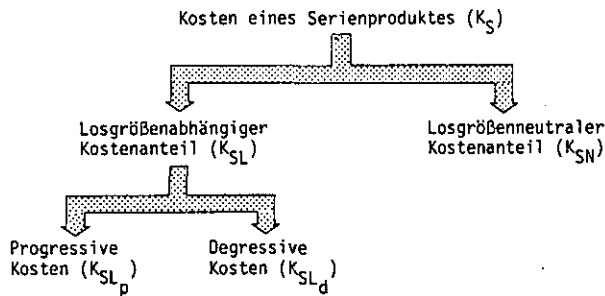


Bild 7.16:

Kostenanteile eines Serienproduktes

Dabei zeigen die losgrößenabhängigen Kosten K_{SL} bei wechselnder Seriengröße mit einem Anteil progressives (K_{SL_p}), mit einem anderen Anteil degressives Verhalten (K_{SL_d}). Diese degressiven Kostenanteile K_{SL_d} erzeugen den allgemeinen Verbilligungseffekt der großen Serie /96/ (Bild 7.17).

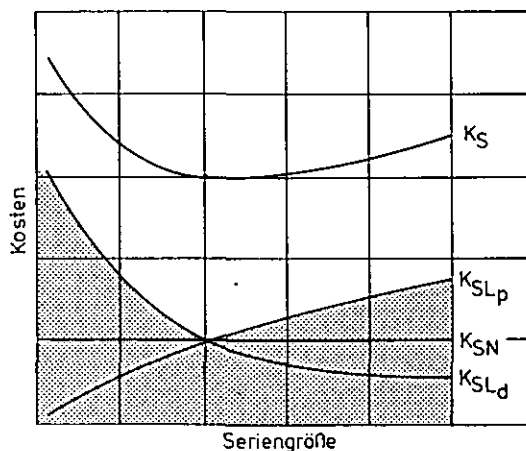


Bild 7.17:

Qualitative Verläufe der Kostenanteile eines Serienproduktes

Inwieweit nun der Verbilligungseffekt durch die degressiven Kosten beim SBB-Bau erreicht wird, zeigt nachfolgende Betrachtung.

Hat zwar die Serienauflage auf die Bauzeit beim Betonstützkörper nur geringen Einfluß (siehe Bild 7.15), so ist ihr Einfluß auf die Kosten schon bedeutsamer, was allerdings von unterschiedlichen Parametern abhängig ist. In Abhängigkeit der Bauweise, des Vorspannverfahrens und der Behältergröße sind in Bild 7.18 die Kostenabschläge aufgelistet, die eine Serienauflage von 2, 6, 12 und 20 Behältern bewirkt.

Behälter-Bauweise \ Seriengröße	Preisabschläge in % bei Serien von Stück			
	2	6	12	30
SBB 189				
Monolith, radial	- 1,2	- 1,8	- 2,1	- 2,1
" wickeln	- 10,5	- 17,5	- 19,0	- 20,0
Block, aufweiten	- 6,5	- 12,0	- 15,5	- 15,5
" wickeln	- 9,5	- 15,0	- 17,5	- 18,5
Segment, wickeln	- 3,0	- 5,0	- 6,0	- 6,0
SBB 600				
Monolith, radial	- 1,1	- 1,7	- 2,0	- 2,0
" wickeln	- 7,5	- 12,0	- 14,0	- 15,0
Block, aufweiten	- 5,0	- 9,5	- 12,0	- 12,0
" wickeln	- 7,0	- 11,5	- 12,5	- 13,0
Segment, wickeln	- 2,5	- 4,0	- 4,5	- 4,5
SBB 900				
Monolith, radial	- 1,0	- 1,6	- 1,9	- 1,9
" wickeln	- 6,0	- 9,5	- 10,5	- 11,0
Block, aufweiten	- 4,5	- 8,5	- 10,5	- 10,5
" wickeln	- 5,5	- 8,5	- 9,5	- 10,0
Segment, wickeln	- 1,5	- 2,5	- 3,0	- 3,0
SBB 1200				
Monolith, radial	- 0,9	- 1,5	- 1,8	- 1,8
" wickeln	- 4,5	- 7,5	- 8,0	- 8,5
Block, aufweiten	- 4,3	- 8,0	- 10,0	- 10,0
" wickeln	- 9,5	- 15,0	- 17,5	- 18,5
Segment, wickeln	- 1,2	- 1,7	- 2,0	- 2,0

Bild 7.18:

Geschätzte Kostenabschläge in % bei der Serienfertigung von SBB mit unterschiedlichen Behältergrößen und -bauweisen

Speziell für den SBB 189 ergeben sich in Abhängigkeit der Bauweise und des Vorspannverfahrens verschieden ausgeprägte Kostendegressionskurven, mit der geringsten Kostendegression beim monolithisch radialvorgespannten Behälter und der größten beim monolithisch gewickelten, wobei bis zum 6. Behälter die größten Einsparungen erzielt werden. Ab dem 12. Behälter ist der Verbilligungseffekt schon sehr klein und ab dem 30. lassen sich sicher keine Verbilligungen mehr erzielen (Bild 7.19).

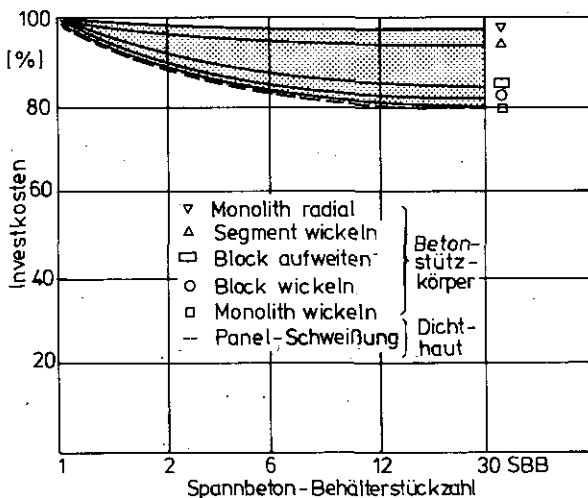


Bild 7.19:

Geschätzte Baukosten-degression für Beton-stützkörper und Liner durch eine Serienauf-lage beim SBB 189 und verschiedenen Behäl-terbauweisen

Betrachtet man die monolithisch gewickelte Behälterbauweise alleine in Abhängigkeit der Behältergröße, so stellen sich annähernd gleiche Kostendegressionskurven ein (Bild 7.20).

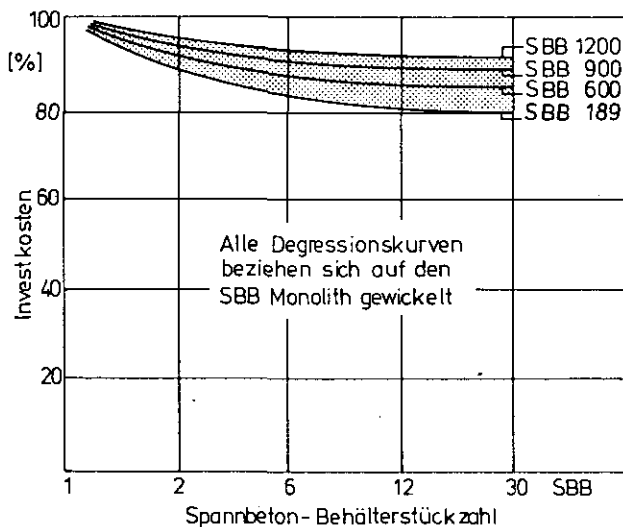


Bild 7.20:

Geschätzte Baukostendegression für Betonstützkörper durch eine Serienauflage beim monolithisch gewickelten Behälter und verschiedenen Behältergrößen

Für die unterschiedlichen Behälterbauweisen läßt sich folgendes feststellen:

- Daß das Wiederholungsmoment der Serie auf den monolithisch radialvorgespannten Behälter praktisch keinen kostenreduzierenden Einfluß hat, dürfte in erster Linie am Radialvorspannverfahren liegen, dessen zeitlicher Aufwand pro Behälter einmal sehr hoch liegt (siehe Bild 7.9) und damit zum einen einen schon relativ hohen Kostenaufwand verursacht (Bild 7.13) und zum anderen sich keine rationelleren Techniken der Radialvorspannung bei einer Serie anbieten.
- Der zwar mit dem mechanisierten Wickelverfahren hergestellte FT-Schalenbehälter verhält sich auf Grund der komplizierten Herstellung der FT-Schalen ebenso kostendegressiv ungünstig wie der radialvorgespannte monolithische.
- Deutlich besser schneidet der Dreierblock ab, der durch den aufgeweiteten und gewickelten Block- und gewickelten Monolithbehälter gebildet wird. Die Bauweise der Blöcke ist einfacher als die der Segmentschalen und die Wickelvorspannung leichter handhabbar als die Radialvorspannung, so daß sich schon durch den geringeren Zeitaufwand ein kleineres Kostenvolumen ergibt, das durch die Serie viel günstiger beeinflussbar ist. Ferner legt sich die im Verhältnis zu den Radialspannpresen viel größere Investitionssumme der Wickelmaschine prozentual stärker auf die einzelnen Behälter um, was zur ausgeprägteren Kostendegression führt. Durch die niedrige Investitionssum-

me für die Baustelleneinrichtung beim Monolithbehälter im Gegensatz zu dem in Teilevorfertigung erstellten Blockbehälter mit jedoch höherer Anlageinvestition für Fertigungs-, Hub- und Montageeinrichtungen läßt sich ein kleiner Vorteil für den gewickelten Monolithbehälter ermitteln, der zwar nicht zeitmäßig jedoch kostenmäßig die günstigste Behälterbauweise darstellt.

- Bei der SBB-Komponente Liner verläuft die Kostendegressionskurve ähnlich der der Bauzeitdegression mit dem Unterschied, daß der Degressionswert mit 18 bis 20 % nicht ganz so hoch liegt wie bei der Kostendegression, da die absoluten Einsparungen auf eine andere Grundzahl bezogen werden.

Allen Kalkulationen /71,88,89/ lagen folgende Annahmen zugrunde:

- Lohn- und Materialpreis vom Februar 1977
- Serienfertigung der SBB hintereinander
- Betrachtung der Zeit- und Kostenverhältnisse am SBB-Stützkörper und am Liner mit Kühlung
- Stationäre Fabrik für die Fertigteilherstellung
- Kalkulierte Zeiten und Kosten stellen Schätzwerte dar

7.7 Zeit- und Kostenschätzung für KKW im deutschen off-shore-Bereich

Die Fertigungsorganisation zur Herstellung von KKW bzw. SBB im off-shore-Bereich ist im Kapitel 6.3.7 beschrieben. Um eine Aussage u. a. auch über die Kosten und Bauzeiten von KKW im deutschen off-shore-Bereich machen zu können, hat die Fa. Dornier System eine Studie / 84/ durchgeführt, die zu folgenden Schätzwerten kommt:

Die Zeitdauer für die Errichtung von KKW im Meer könnte 13 bis 15 Jahre betragen und die Mehrkosten gegenüber Landanlagen dürften zwischen 6 und 28 % je nach dem Stromübertragungssystem liegen.

7.8 Zeit- und Kostenschätzung des Abbruches von SBB und der Stillegung von KKW

Einschlägige Baufirmen /90/ schätzen den Zeitaufwand für das Abbrechen des SBB in Form von Sprengungen genau so hoch ein wie für den Aufbau. Die Kosten dafür dürften etwa 3/4 der Aufbaukosten ausmachen. Diese Schätzungen sind wie beim gesamten KKW von sehr vielen Faktoren abhängig, wie z.B. von Reaktorgröße, -funktion, -typ, -bauweise, -betriebszeit, Genehmigungsaufgaben, Standortgegebenheiten und Abbruchverfahren, um nur einige zu nennen.

Schätzwerte zu Stilllegungskosten von KKW über die Addition von Einzelschätzungen sind auf der Preisbasis von 1975 in Bild 7.21 für ein KKW der 1200 MW_{e1} Klasse ermittelt /70/ und zeigen, daß je nach Stilllegungsvariante und Reaktortyp Stilllegungskosten zwischen 12 und 270 Mio DM zu veranschlagen sind, wobei bei der HTR-KKW-Totalbeseitigung der größte Kostenanteil durch den Ausbau aller metallischen und keramischen Einbauten des Primärsystems gebildet wird.

Stilllegungsvariante	Kosten beim LWR	Kosten beim HTR
<u>Gesicherter Einschluß</u> Mindestaufwand ohne jegliche Demontage von Komponenten -einmalige Kosten (Mio DM) -laufende Kosten jährlich (Mio DM)	12 0,02 bis 0,13	keine Angabe keine Angabe
<u>Teilbeseitigung mit gesichertem Resteinschluß</u> Ohne Kosten für die Endlagerung -einmalige Kosten (Mio DM) -laufende Kosten jährlich (Mio DM)	65 bis 100 0,005 bis 0,02	keine Angabe keine Angabe
<u>Totale Beseitigung</u> Ohne Kosten für die Endlagerung -einmalige Kosten (Mio DM) -laufende Kosten jährlich (Mio DM)	110 bis 150 0	180 bis 270 0

Bild 7.21: Schätzkosten der Stilllegung von KKW in Mio DM

Zu vermerken wäre noch, daß sich durch die Stilllegungskosten eines LWR der 1200 MW_{e1}-Klasse die Stromkosten um 0,1 Pfg/KWh erhöhen, was jedoch die Wirtschaftlichkeit dieser gegenüber fossilen Kraftwerken nicht in Frage stellt.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Behälterformgestaltung und -anordnung ist ein Trend zum stehenden Zylinder mit einfachen geraden Abschlüssen in Multikavernenbauweise festzustellen, was hauptsächlich durch eine gute geometrische Zugänglichkeit zu den Primärkreiskomponenten und deren Sicherheitseinschluß durch einen Betonmantel bedingt ist.

Durch diese Behälteranordnung wird die Behälterstruktur sehr komplex. Dies ist einer der Hauptgründe dafür, den Spannbetonbehälter weiterhin als Monolith zu bauen und auf eine Fertigteilkonstruktion vorerst zu verzichten, trotz diverser Vorteile, die sie mit sich bringt. Weitere Vorteile des monolithisch erstellten Spannbetonbehälters liegen in niedrigen Herstellkosten und der Nutzung vorhandener Bau- und Betriebserfahrungen.

Bei der horizontalen Vorspannung scheint sich die Wickelvorspannung durchzusetzen, die die Nachteile anderer Vorspannverfahren wie große Reibungsverluste, hoher Spann- und Schlaffstahlbedarf und hohe Spanngliedverankerungskosten reduziert.

Bei der Dichthaut (Liner) wird z. Zt. die Frage des Einsatzes eines warmen oder heißen Liners anstelle des konventionellen kalten diskutiert; diese Problematik beruht auf der Forderung der Wiederholungsprüf- und Reparierbarkeit, die beim warmen und heißen Liner durch das Fehlen der corezugewandten Linerisolierung möglich sind. Von den z. Zt. im Versuchsstadium befindlichen heißen Linerkonzepten einschlägiger Firmen und Institutionen wird der praktische Einsatz durch fehlende Lebensdaueruntersuchungen des höher temperaturbeaufschlagten Linerbleches behindert; deswegen stellt man schon heute Überlegungen an, den Liner mit einer geringeren Temperatur von 100 bis 150°C zu beaufschlagen.

Strebt man im Stahlguß- oder Graugußbehälterbau für Reaktoren sogenannte warm- oder heißgehende Druckbehälter an, so bleibt die Isolierung im Spannbetonbehälterbau vorerst eine feste Forderung, da die Temperaturbelastung des Betons und der Spannkabel limitiert ist.

Behälterabschlüsse und -durchführungen werden weitgehend als selbsttragende Konstruktionen ausgelegt. Bei den Rohrleitungen und Deckeln aus Stahl stehen z. Zt. Überlegungen an, diese als Doppelrohre bzw. Doppeldeckel auszuführen.

Den neuesten Stand der Ausführung bei Deckeln aus Beton stellen vorgespannte dar, die zusammen mit dem Spannbetonbehälterstützkörper verspannt werden.

Zur Erleichterung bzw. Ermöglichung einer Wiederholungsprüfung beim kalten Liner-Wärmeschutzsystem sieht man zwischen dem Linerblech und dem thermischen Schild einen sogenannten Inspektions- und Reparaturspalt vor, und ordnet leicht abnehmbar die Isolierung entweder am Linerblech selbst oder auf der Rückseite des thermischen Schildes an.

Die Stilllegung eines Kernkraftwerkes stellt aufgrund des hohen Aktivitätsinventars besondere Ansprüche an die Stilllegungsvarianten. Als Stilllegungsvarianten kamen bei bereits stillgelegten Kernkraftwerken der gesicherte Einschluß, die Teilbeseitigung mit gesichertem Resteinschluß und die totale Beseitigung zum Einsatz. Diese bedingt auch einen Abbruch des Spannbetonbehälters. Hierfür sind grundsätzlich thermische, chemische, mechanische, chemisch-mechanische und elektromagnetische Verfahren denkbar. Ein ideales Abbruchverfahren gibt es nicht, wobei sich das optimale an den speziellen vorliegenden Verhältnissen zu orientieren hat. Ein weiterer kritischer Punkt beim Abbruch liegt dabei im Transportmittel "Behälter" von nur 200 bis 400 ltr. Fassungsvermögen für abgebrochenes Spannbetonbehältergut und in der z. Zt. noch beschränkten Aufnahmekapazität der einzigen in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen Einlagerungsstätte für radioaktive Abfälle in Asse.

Zum Zwecke der Serienfertigung von Spannbetonbehältern wurde dieser einmal in monolithischer, einmal in Fertigteilblockbauweise und einmal in Fertigteilschalenbauweise mit unterschiedlichem Spannverfahren und Baugröße konzipiert. Für die Behälterfertigung selbst sind vier Möglichkeiten der Ablauforganisation denkbar, wobei die vierte Möglichkeit eine Fließformation vorsieht, bei der die Spannbetonbehälter in einer Produktionshelling fließreihenähnlich gefertigt werden. Diese Fertigungsform wird z. Zt. bei der gleichzeitigen Herstellung von acht amerikanischen Kernkraftwerken verwirklicht und wird auch in Kürze in der UdSSR zu finden sein. Für die Bundesrepublik Deutschland sind für den Bau solcher Kernkraftwerke im deutschen off-shore-Bereich die beiden wichtigen Voraussetzungen nicht vorhanden, nämlich eine entsprechend große Kernkraftwerks- und damit Spannbetonbehälterstückzahl, die die hohen Investitionen der Fertigungseinrichtungen rechtfertigt sowie geeignete Küstenstandorte an Nord- und Ostsee, so daß diese Fertigungsorganisation der off-shore-Fertigung für die Bundesrepublik Deutschland vorerst nur theoretischen Charakter hat.

Um die Auswirkungen verschiedener Auslegungsparameter von Spannbetonbehälter auf die Kosten aufzuzeigen, wurden Kostengleichungen aufgestellt, die sich zwar auf den Spannbetonbehälter eines 200 MW_{el} gasgekühlten Hochtemperaturreaktors beziehen, für einen ersten Kostenanhalt jedoch auch auf Spannbetonbehälter anderer Konstruktion und Größe extrapolierbar sind.

Die zeitaufwendigsten Tätigkeiten bei der Herstellung des Spannbetonbehälters SBB 189 (PR 500), nichtintegrierte, monolithische Bauweise mit Wickelvorspannung vorausgesetzt, sind die Bewehrungsarbeiten für Schlaff- und Spannstahl mit ca. 34 % und der Einbau der Wandauskleidung (Liner) mit rd. 30 %.

Bei den Kosten fallen auf die Wand- und Durchführungsauskleidung (Liner+Panzerrohre) mit den Kühlrohren und der Kohlesteinisolierung rd. 50 % der Gesamtbehälterkosten an. Die Betonhülle mit der schlaffen und vorgespannten Bewehrung nimmt dagegen nur ca. 16 % der Gesamtkosten ein.

Bezüglich verschiedener Behälterbauweisen sind das Spannverfahren, die Spannstahlmenge und die Art der Vorfertigung zeit- und kostenbestimmend. Der aus Betonblöcken vorgefertigte und bewickelte Spannbetonbehälter weist die kürzeste Behälterbauzeit auf, was neben der Vorfertigung der Betonhülle auf das schnell zu bewerkstellende Wickelspannverfahren zurückzuführen ist. Die längste Bauzeit beansprucht die monolithische Behälterbauweise mit dem Radialspannverfahren, da keine zeitsparende Vorfertigung vorliegt und das Radialspannverfahren abschnittsweise aufzubringen ist.

Bei den Kosten für die verschiedenen Behälterbauweisen ist ein anderer Trend festzustellen. Die zeitsparende Vorfertigung der Fertigteile ist aufgrund der Verwendung von Fabrikschalungen, des anschließenden Transportes dieser Fertigteile und der noch auszuführenden Montage kostspieliger, so daß die monolithische Behälterbauweise hier die niedrigsten Kosten verursacht.

Eine Serienauflage von Spannbetonbehältern hat auf die Bauzeit der Behälterhülle mit schlaffer und vorgespannter Bewehrung geringen Einfluß. So beträgt die Zeitreduktion bei Fertigung von 30 Spannbetonbehältern für die Behälterhülle nur rd. 4 %. Günstiger gestaltet sich die Zeiteinsparung bei der Wandauskleidung (Liner) mit rd. 30 bis 35 %, was hauptsächlich auf nicht standortspezifische Arbeiten zurückzuführen ist. Die Kosteneinsparungen liegen dafür zwischen ca. 2 und 20 % bei einer Serie von 30 Spannbetonbehältern, wobei bis zum 6. Behälter die größten Einsparungen erzielt werden. Ab dem 12. Behälter ist der Verbilligungseffekt schon sehr klein und ab dem 30. lassen sich sicher keine Verbilligungen mehr erzielen.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Schnellenbach, G.
Spannbeton-Reaktordruckbehälter für Kernkraftwerke
in Konstruktiver Ingenieurbauberichte, Heft 10, 1971
- /2/ Schnellenbach, G.
Statische Nachweise für Spannbeton-Druckbehälter im Gebrauchszustand
in Konstruktiver Ingenieurbauberichte, Heft 10, 1971
- /3/ Schnellenbach, G.
Entwicklung der Bautechnik bei Kernkraftwerken
in Konstruktiver Ingenieurbauberichte, Heft 23, 1975
- /4/ Deutsche Normen
Klassifizierung von Betonen nach Elementanteilen bei Verwendung
zur Neutronenabschirmung
DIN 25413 vom März 1976
- /5/ Schulten, R. u. a.
Vorlesung und Übung zur Reaktortechnik an der RWTH-Aachen 1976
- /6/ Deutsche Normen
Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung
DIN 1045 vom Januar 1972
- /7/ Deutsche Normen
Reaktordruckbehälter aus Spannbeton
Studie für einen Norm-Entwurf, Juni 1972
- /8/ Hartmann, G. u. a.
Systemanalytische und parametrische Untersuchungen von Spannbeton-
Reaktordruckbehältern
in Konstruktiver Ingenieurbauberichte Heft 19, 1974
- /9/ Leonhardt, F.
Spannbeton für die Praxis
3. Aufl., Berlin 1973
- /10/ Bühner, R.
Spannstähle und deren Eigenschaften für die Verwendung bei Spann-
verfahren
in VDI-Bericht 257, 1976
- /11/ Zerna, W.
Kernreaktor-Druckbehälter aus Spannbeton und Verfahren zur Vorspannung
eines solchen Behälters
Offenlegungsschrift 1709155, Offenlegungstag 19.8.1971
- /12/ Gruhl, H. u. a.
Planung, Bau und experimentelle Erprobung eines Reaktordruckbehälters
aus Spannbeton
Siemens AG, Reaktortechnik, Teil A und B, 1971

- /13/ Dyckerhoff & Widmann AG
Für einen Kernreaktor bestimmter in Längs- und Ringrichtung vor-
gespannter Beton-Druckbehälter
Auslegeschrift 1434612, Auslegetag 5.1.1972
- /14/ Dyckerhoff & Widmann AG
Aus Spannbeton bestehender Druckbehälter
Offenlegungsschrift 1559150, Offenlegungstag 18.11.1971
- /15/ Mühe, L.
Polygonal geführte, gewickelte Ringspannbewehrung mit mehreren
Zwischenverankerungen aller Spanndrahtringe (System Prisma)
Zweite Informationstagung über Reaktordruckbehälter aus Spannbeton
und ihre Wärmeisolierung, Brüssel, Nov. 1969
- /16/ Dyckerhoff & Widmann AG
Spannbeton-Druckbehälter mit Ringspanngliedern, die durch Aufweiten
der gebildeten Ringe gespannt sind
Auslegeschrift 1684643, Auslegetag 19.10.1972
- /17/ Dyckerhoff & Widmann AG
Verfahren zum Herstellen eines Spannbeton-Druckbehälters, bei denen
ein äußerer und ein innerer Wandungsteil zeitlich unterschiedlich
voneinander entstanden sind.
Auslegeschrift 2127566, Auslegetag 16.11.1972
- /18/ Dyckerhoff & Widmann AG
Spannbeton-Druckbehälter
Auslegeschrift 2214083, Auslegetag 7.6.1973
- /19/ Scheler, J.
Verspannungsmöglichkeiten für einen aus Stahlsegmenten aufgebauten
Hochtemperaturreaktor
KFA-IRE-IB-7/75 der Kernforschungsanlage Jülich, 1975
- /20/ Wölfel, E.
Spannverfahren für den Bau von Kernkraftwerken
in VDI-Bericht 257, 1976
- /21/ Mühe, L.
Einzelspannglieder für die Vertikalvorspannung mit Bruchlasten über
1500 Mp
Zweite Informationstagung über Reaktordruckbehälter aus Spannbeton
und ihre Wärmeisolierung, Brüssel, Nov. 1969
- /22/ Wrage, S.
Konstruktion und Ausführungstechnik
in Konstruktiver Ingenieurbauberichte, Heft 23, 1975
- /23/ Kordina, K.
Konstruktionsprinzipien der Spannverfahren mit Ankerkörpern
in VDI-Bericht 257, 1976
- /24/ Bechert, H.
Konstruktionsprinzipien der Verankerung durch Verbund
in VDI-Bericht 257, 1976

- /25/ Böhm, B.
Untersuchung über die Realisierbarkeit eines vorgespannten,
gußeisernen Reaktordruckbehälters
Battelle-Institut, Frankfurt, 1973, Teil I
- /26/ Böhm, B.
Untersuchung über die Realisierbarkeit eines vorgespannten,
gußeisernen Reaktordruckbehälters
Battelle-Institut, Frankfurt, 1974, Teil II
- /27/ Zintl, H.
Interne Untersuchung zur Kostenermittlung von warmgehenden, vorge-
spannten Graugußbehältern und Spannbetonbehältern
KFA-IRE, 1975
- /28/ Faninger, G. u. a.
Vergleich verschiedener Linerkonzepte für Spannbeton-Druckbehälter
in Leichtwasserreaktoren
Battelle-Institut, Frankfurt, 1976
- /29/ Nemet, J.
Reaktordruckbehälter aus Spannbeton mit heißer Dichthaut
First international Conference on "Structural Mechanics in Reactor
Technology" Berlin 1972
- /30/ Jungmann, H. u. a.
Spannbetonreaktordruckbehälter mit heißer Dichthaut für Druckwas-
serreaktoren
SBB-Tagung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin 1975
- /31/ HRB
HHT-Referenzanlage Band I,II,III Juni 1977
- /32/ Schwabe, A.
Die verschiedenen Möglichkeiten industrieller Vorfertigung. Unter-
suchung von Montagebausystemen
in Studienhefte zum Fertigteilbau, Heft 3/4, 1965
- /33/ Kübler, K.
Produktion und Montage eines Bausystems aus Bauelementen
in Studienhefte zum Fertigteilbau, Heft 9/10, 1969
- /34/ Huber, G.
Besondere bautechnische Probleme bei der Erstellung eines Spannbeton-
druckbehälters. Vergleich französischer, englischer und deutscher
Techniken
in Techn. Mitteilungen Krupp, Forschungsbericht Heft 2, 1973
- /35/ Voigt, J.
Fertigungstechnische Auslegung und konstruktive Gestaltung eines
vorgespannten Stahlgußdruckbehälters für einen Hochtemperatur-
reaktor 3000 MWth
Veröffentlichung in Vorbereitung

- /36/ Lukaszewicz, J.
Das Temperaturverhalten eines Hochtemperaturreaktors nach Ausfall
der gesamten Kühlung
KFA-Jülich, JÜL-1112-RG, 1974
- /37/ Dyckerhoff & Widmann
Mitteilung über Leca-Isolierbeton vom 2.2.1977
- /38/ Technischer und Sicherheitsbericht THTR-Prototyp 300 MWe
Brown Boveri-Krupp Reaktorbau GmbH, KFA, 1969, Bd I und II
- /39/ Spandick, W.
Das Krupp-Wärmeschutzsystem mit heißem Liner für vorgespannte
Druckbehälter in Kernreaktoren
in Techn. Mitteilungen Krupp, Forschungsbericht Bd. 34 ,H 1, 1976
- /40/ Würdig, P.
Technische Isolierung für Spannbetondruckbehälter
in atomwirtschaft Heft 4, 1968
- /41/ Sicherheitsbericht des Kernkraftwerkes HTR 1160
Heliumgekühlter und graphitmoderierter Thoriumhochtemperaturreaktor
mit blockförmigen Brennelementen
Brown Boveri & Cie AG Mannheim und HRB Mannheim, 1973
- /42/ Schulten, R. u. a.
Industriekernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor PR 500 - "Otto-Prin-
zip" - zur Erzeugung von Prozeßdampf
JÜL-941-RG, Kernforschungsanlage Jülich, 1973
- /43/ Lotz, H. u. a.
Isolierung, Liner und Kühlung des Spannbetonbehälters für das
300-MWe-THTR-Prototyp-Kernkraftwerk
in Konstruktiver Ingenierbauberichte, Heft 10, 1971
- /44/ Schröder, K.
Große Dampfkraftwerke - Planung, Ausführung und Bau
Göttingen, Heidelberg, 1962
- /45/ Maniago, D.P.
Kernkraftwerke im Meer - eine amerikanische Realität
in atomwirtschaft, März 1974
- /46/ UDSSR-Kernkraftwerke "vom Fließband"
in fakten 6.76 und 8.77 der Bonner Redaktion Energie-Verlag GmbH
- /47/ Bremer, F.
Entwicklung eines Spannbetondruckbehälters für Leichtwasser-
reaktoren und zugehörige Komponenten
in Techn. Mitteilungen Krupp, Forschungsberichte Heft 3, 1973
- /48/ Huber, G.
Verbund von Liner und Durchführungen mit dem Beton von Spannbeton-
Reaktordruckbehältern
in Techn. Mitteilungen Krupp, Forschungsberichte Heft 3, 1973

- /49/ Jungmann, A. u.a.
Spannbeton-Reaktordruckbehälter mit heißer Dichthaut für Druckwasserreaktoren
in Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 264, 1976
- /50/ Fürste, W. u. a.
Prestressed Concrete Reactor Vessels for Nuclear Power Plants compared to thick-walled and Multilayer Steel Vessels
Conference on Prestressed Concrete Reactor Vessels, 1973
- /51/ Bähre
Spannbetonbehälter mit Einbauten für Zweikreisanlagen 600 MW_e-Reaktor
Zeichnungsentwurf Nr. 100-25-0, KFA-IRE-Jülich, 1977
- /52/ Bindseil, P. u. a.
Deckelvarianten für einen Spannbetonbehälter für Leichtwasserreaktoren
in Techn. Mitteilungen Krupp, Heft 3, 1973
- /53/ Kugeler, M.
Behälterentwicklung für HTR's
Interner Bericht KFA-Jülich, KFA-IRE-IB-2/75, 1975
- /54/ Frühauf, H. u. a.
Entwurf und Spannungsberechnung eines Spannbeton-Druckbehälters aus Fertigteilen
Conference on "Structural Mechanics in Reactor Technology", Berlin 1973
- /55/ Mayer, C. u. a.
Über die Instrumentierung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
SBB-Tagung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin 1975
- /56/ Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm
Druckkessel, insbesondere für einen Reaktor
Offenlegungsschrift 2159677, Offenlegungstag, 15.6.1972
- /57/ VDI
Konstruktionsmethodik, Technisch-wirtschaftliches Konstruieren
VDI-Richtlinien 2225, Blatt 1
- /58/ HRB
Entscheidungsanalyse zur ersten Einengung der Variantenzahl des Reaktordruckbehälters für das Reaktorkonzept HTR-K, Okt. 1976
- /59/ Kröger, W.
Einführende Darstellung der Eigenschaften des Betons und seine Anwendung als Werkstoff für Reaktorschutzbehälter
Interner Bericht, KFA-Jülich, KFA-IRE-IB-6/73, 1973
- /60/ Hilsdorf, H.K. u.a.
Studie über den Abbruch von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
Institut für Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, 1976/1977
- /61/ Quittek, Ch.
Vorgespannte Gußeisendruckbehälter für Kernreaktoren
Interner Bericht, KFA-Jülich, KFA-IRE-13/74, 1974

- /62/ HRB
HHT-Referenzanlage Band I,II,III, Juni 1977
- /63/ BBC, EIR, GS, HRB, KFA
HRB-Bericht BB 1614 vom 24.6.1977, Konzeptvergleich HTR-K/HHT
- /64/ HRB
HTR-K-Konzeptentwurf Band I,II,III, Juni 1977
- /65/ Zintl, H.
Linerreparatur bei Druckbehältern für gasgekühlte Reaktoren
Veröffentlichung in Vorbereitung
- /66/ Hahn, u. a.
Entwicklung eines Reparaturkonzeptes für den Liner eines Hochtemperaturreaktors mit Spannbetonbehälter
Konzept der Kraftanlagen AG Heidelberg, 1976
- /67/ Eisenblätter, J. u. a.
Zur Anwendung der Schallemissionsanalyse in Forschung und Technik in Metall, 31. Jg. (1977), Heft 1 und 2
- /68/ Hick, H.
Persönliche Mitteilung des H. Dr. Hick der österreichischen Studiengesellschaft für Atomenergie GmbH, Forschungszentrum Seibersdorf vom 2.6.1977
- /69/ Schwarzwälder, R.
Stilllegung von Kernkraftwerken
in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 26. Jg. (1976), Heft 7
- /70/ Brosche, D. u.a.
Zur Stilllegung von Kernkraftwerken - Bericht über eine VDEW-Untersuchung
in Atom + Strom, Jg. 22 (1976), Heft 3
- /71/ Dyckerhoff & Widmann AG
Grundkonzept zum Bau eines Spannbetonbehälters aus Fertigteilen für den HTR Pr 500 in Zusammenarbeit mit dem IRE-KFA-Jülich, März 1977
- /72/ Mellerowicz, K.
Betriebswirtschaftslehre der Industrie
3. Aufl., Freiburg, 1968
- /73/ Gutenberg, E.
Kurzlexikon betriebswirtschaftlicher Begriffe
in Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 46. Jg. 1976
- /74/ Jacob, H.
Allgemeine Betriebswirtschaftslehre
Wiesbaden 1969
- /75/ Refa
Refa-Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 3: Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung, 3. Aufl., München 1973

- /76/ Dolezalek, Cm.
Planung von Fabrikanlagen
Berlin, Heidelberg, New York 1973
- /77/ Kehnemuyi, M. u. a.
The Atlantic Generation Station - off-shore nuclear power plant
in Nuclear Engineering International , Heft Juni, 1973
- /78/ Collier, A.R. u. a.
Floating nuclear plant design - off-shore nuclear power plant
in Nuclear Engineering International, Heft Juni, 1973
- /79/ Ashworth, J.A
Site related design for the Atlantic Generating station - off-shore
nuclear power plant
in Nuclear Engineering International, Heft Juni, 1973
- /80/ Turner, J.E.
Manufacturing plants, concepts and facilities for floating nuclear
power plants - off-shore nuclear power plant
in Nuclear Engineering International, Heft Juni, 1973
- /81/ Collier, A.R. u. a.
Floating Nuclear Power Plants for Offshore Siting
in Westinghouse Engineer, Heft Nov. 1972
- /82/ N.N.
Platform-mounted CNSG reactor concepts
- /83/ Zintl, H.
Organisationstypen industrieller Fertigung
Interne Untersuchung am Institut für Arbeitswissenschaft der
TU-Berlin, Dez. 1974
- /84/ Dornier System - Meerestechnik
Kernkraftwerke im deutschen Offshorebereich
Durchführbarkeitsstudie Bd I,II,III, 1976
- /85/ Waters, T.C. u. a.
Economic Comparison between cylinders and spheres
I. Brit. Nucl. Energy Soc. 2 (1962), Nr. 3
- /86/ Chen Pang Tan
Choise of prestressing system and tendon size
Prestressing concrete in nuclear pressure vessels, a critical review
of current Literatur, Contract Nr. W-7405-eng-26, 1968
- /87/ Spencer, A.
Feasibility Design of Prestressed Concrete Pressure Vessels for
High Pressure Gas Cooled Reactors
in AAEC/TM 390 Australian Atomic Energy Commission, 1967
- /88/ Steinmüller GmbH
Persönliche Mitteilungen des H. Hemschemeier vom 17.2.1977

- /89/ Krupp GmbH
Persönliche Auskunft des H. Bremer vom 17.12.1975
- /90/ Strabag AG
Persönliche Auskunft des H. Meiling vom 27.4.1977
- /91/ Kugeler, K.
Technik von nuklearen Anlagen zur Prozeßwärme- und zur Strom-
erzeugung
Vorlesung I und II an der RWTH-Aachen, 1977
- /92/ Ludewig, S.
Montagebau, Grundlagen-Wissensspeicher
Köln 1974
- /93/ Lacroix, R.
Principle of "hot wall" insulation for prestressed concrete reactor
vessels.
Int. Conf. on Experience in the Design, Construction and Operating of
Prestressed Concrete Pressure Vessels and Containments for Nuclear
Reactors, York, 1975
- /94/ Schnellenbach, G.
Besondere Probleme bei Spannbeton-Reaktordruckbehältern und ihren
Komponenten
in Konstruktiver Ingenieurbauberichte, Heft 23, 1975
- /95/ Kodina, K.
Konstruktionsprinzipien der Spannverfahren mit Ankerkörpern
in VDI-Bericht 257, 1976
- /96/ Berthold, W.
Grundlagen der Serienbildung in der industriellen Bauelementproduktion
Diss. TU-Hannover, 1970
- /97/ Zerna, W.
Berechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern unter Berücksichti-
gung des Kriechens und Schwindens
Ruhr-Universität Bochum, 1975
- /98/ Zerna, W.
Oberlastungsnachweise für Spannbeton-Reaktordruckbehälter
Ruhr-Universität Bochum, 1972
- /99/ Zerna, W.
Parametrische Behälterberechnungen unter Einbeziehung kugelförmiger
Geometrien
Ruhr-Universität Bochum, 1975
- /100/ Meyer, H.J.
Lecksuchverfahren
in Jahrbuch der Dampferzeugungstechnik, 3. Aufl., Essen 1976